



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ
ΕΛΙΚΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ – ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ Κ. ΓΕΩΡΓΙΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΤΟΥΡΛΙΔΑΚΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον επιβλέποντα Καθηγητή Α. Τουρλιδάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να φέρω εις πέρας την παρούσα Διπλωματική Εργασία και για την υποστήριξή του καθ' όλο το διάστημα εκπόνησής της. Τον ευχαριστώ από καρδιάς για όλες τις γνώσεις που απέκτησα μιας και η διδασκαλία, ο ενθουσιασμός του και η αγάπη του για τον κόσμο των αεροκινητήρων αποτέλεσαν μεγάλη πηγή έμπνευσης για εμένα αλλά και αφετηρία μύησής μου.

Ευχαριστώ ολόψυχα τον Διδάκτορα Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Χρήστο Α. Καλαθάκη. Η συνεργασία μου μαζί του αποτέλεσε σταθμό στην εξέλιξή μου ως Μηχανικός μα κυρίως στην εξέλιξή μου ως Άνθρωπος. Νιώθω μεγάλη συγκίνηση και ευγνωμοσύνη που υπήρξε δάσκαλός μου, καθοδηγητής μου, συνοδοιπόρος και σύντροφος στο ταξίδι μου. Αποτελεί λαμπρό παράδειγμα Μηχανικού, στυλοβάτη του κλάδου των αεροκινητήρων. Νιώθω αιώνια ευγνώμων για όσα διδάχτηκα, καθώς το αποτύπωμα της επιστημονικής του εμπειρίας άφησε ανεξίτηλη σφραγίδα στην διαμόρφωση των γνώσεων μου και της ακαδημαϊκής μου σκέψης. Τον ευχαριστώ που μου έδειξε τον δρόμο για να κάνω των ονείρων μου τα ταξίδια. Ψυχή Βαθιά.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλο το προσωπικό της Υπηρεσίας Δοκιμαστηρίων Α/Κ της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (ΕΑΒ) για όλες τις χαρές και τις δυσκολίες που περάσαμε μαζί, με ιδιαίτερη μνεία στον Προϊστάμενο του χώρου κ. Θεοδόσιο Αντωνιάδη Λιόκαρη. Σπάνιο κράμα ανθρώπου και επαγγελματία με πολυετή εμπειρία στον χώρο. Φέρει τον τίτλο του Δοκιμαστή με τιμή και διατηρεί την μακρά παράδοση των εκλεκτών και ικανότατων Προϊσταμένων, αντιμετωπίζοντας τις ποικίλες προκλήσεις του πόστου με επαγγελματισμό, αφοσίωση και υψηλό αίσθημα ευθύνης, διασφαλίζοντας την αδιάληπτη λειτουργία του τμήματος.

Ευχαριστώ τον Μηχανολόγο Μηχανικό και έτερο Δοκιμαστή κ. Σάββα Παπαδόπουλο, για όλη την υποστήριξη, την πίστη, την φροντίδα του, την ανοχή του, μα πάνω από όλα τον ευχαριστώ για την αληθινή του αγάπη.

Θερμά ευχαριστώ την συμφοιτήτρια και συνάδελφο Μηχανολόγο Μηχανικό κα Κατερίνα Φωτίου, για όλες τις στιγμές που ζήσαμε μαζί. Η απεριόριστη υποστήριξη και αγάπη της, στάθηκαν αρωγός στην προσπάθειά μου. Ήταν τιμή μου.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Διευθυντή του εργοστασίου Α/Κ της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (ΕΑΒ), κ. Γεώργιο Μπάτσο για την εμπιστοσύνη και την βοήθεια που μου παρείχε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για όλες τις θυσίες, την υπομονή τους, την συνεχή και αμέριστη συμπαράστασή τους σε κάθε σημείο της διαδρομής. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αφιερώνεται σε αυτούς. Γιατί στο τέλος, και τα παρτάλια οι σκέψεις μας πειρατική σημαία, όλα στραβά γινήκανε και όλα είναι ωραία.

Περίληψη

Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας με τον τομέα των Α/Κ να αποτελεί την αιχμή του δόρατος. Η λειτουργία ενός τέτοιου κινητήρα θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μια απαιτητική χορογραφία, όπου κάθε συνιστώσα του, αν εκτελέσει με ακρίβεια όλα τα βήματα, το τελικό αποτέλεσμα θα είναι ένας αδιάλειπτος χορός ρέοντος αέρα και εξωτικών κραμάτων μετάλλου. Στο τέλος, θα πρέπει να αξιολογηθεί και είτε να βελτιωθεί είτε να συνεχίσει με τον ίδιο ρυθμό.

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι ακριβώς η αξιολόγηση αυτής της χορογραφίας, με την κατασκευή ενός αλγορίθμου, ο οποίος θα δέχεται τις εξαχθείσες, από την διαδικασία εκτίμησης της αποδοτικότητάς του, τιμές και εκτελώντας τις απαιτούμενες διορθώσεις αυτών, θα εξάγει το τελικό αποτέλεσμα.

Είναι απόλυτα κρίσιμο να αντιληφθεί κανείς, την σπουδαιότητα της λεγόμενης διόρθωσης των μετρήσεων. Τα δεδομένα που λαμβάνονται στην διάρκεια εξαγωγής του επονομαζόμενου και ως Performance, σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να θεωρούνται ενδεικτικά της υγείας του κινητήρα, καθότι είναι άμεσα εξαρτώμενα από τις συνθήκες περιβάλλοντος του χώρου στον οποίον λαμβάνει χώρα η δοκιμή. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν χαρακτηρίζονται από σταθερότητα αλλά μεταβάλλονται με μεγάλη συχνότητα. Για παράδειγμα, υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος αέρα επιδρούν αρνητικά στην αποδιδόμενη ισχύ ενός αεριοστρόβιλου, ενώ αντίθετα, χαμηλές τιμές διευκολύνουν την λειτουργία του. Για την αντιμετώπιση αυτών των διακυμάνσεων, συνηθίζεται να γίνεται αναγωγή των αποτελεσμάτων σε συνθήκες τυπικής μέρας το οποίο συνεπάγεται θερμοκρασία 15°C, ατμοσφαιρική πίεση 101,325 Pa και σχετική υγρασία 0%. Η αναγωγή αυτή πραγματοποιείται με την εφαρμογή συγκεκριμένων εξισώσεων στα μεγέθη ενδιαφέροντος, τα οποία απαρτίζονται από την ειδική κατανάλωση καυσίμου, την αποδιδόμενη ισχύ και την ροή του καυσίμου.

Ο αλγόριθμος αυτός, αναπτύχθηκε με την βοήθεια του εργαλείου App Designer, το οποίο περιλαμβάνεται στα προσφερόμενα σχεδιαστικά εργαλεία της γλώσσας προγραμματισμού Matlab. Υποστηρίζεται η δυνατότητα εξαγωγής της απόδοσης τριών τύπων Α/Κ της οικογένειας Allison T56, των T56-A-15, T56-A-14 και T56-A-7B. Δεν θα μπορούσε να παραλειφθεί η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων, συγκρίνοντάς τα με αυτά που προκύπτουν από το υπάρχον χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (EAB).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη με αντικείμενο την μεταβολή είτε μεμονωμένη είτε σε συνδυασμό, όλων των ειδών των παραμέτρων που συμμετέχουν στο Performance, με στόχο τον εντοπισμό των μεγεθών εκείνων που επηρεάζουν σημαντικά τις τελικές επιδόσεις του Α/Κ. Για τον σκοπό αυτό παρατέθηκε πληθώρα 2D και 3D διαγραμμάτων, που καταδεικνύουν την ασκούμενη επιρροή κάθε μεγέθους και αποτυπώνουν την σημαντικότητα η μη της επιρροής αυτής. Για την υλοποίηση της παραμετρικής ανάλυσης, διενεργήθηκε αυξομείωση όλων των στοιχείων κατά 5% της αρχικής τους τιμής και αποτύπωση της ποσοστιαίας μεταβολής στην συμπεριφορά των διορθωμένων τιμών των s.f.c., TMHP και FF με την βοήθεια

διαγραμμάτων. Προχωρώντας την μελέτη ένα βήμα παραπέρα, εντοπίστηκαν τα σημαντικότερα εξ αυτών μετρούμενα μεγέθη και συνδυαστικά, διατηρώντας την αυξομείωση σε ποσοστό 5%, εξετάστηκε εκ νέου η επίδρασή τους.

Abstract

The modern era is characterized by rapid technological development, with the field of gas turbines being at the forefront. The operation of such an engine could be described as a demanding choreography, where if each component performs all its steps with precision, the result will be an uninterrupted dance of flowing air and exotic metal alloys. In the end, it must be evaluated and either improved or maintained at the same pace.

The subject of this Thesis is precisely the evaluation of this choreography, through the development of an algorithm. This algorithm will take the values extracted from the efficiency estimation process and, by applying the necessary corrections, will yield the final result.

It is absolutely critical to understand the importance of what is called “measurement correction.” The data obtained during the extraction of the Performance should in no way be considered indicative of the engine’s health, as they are directly dependent on the environmental conditions in which the test takes place. Atmospheric conditions are not stable but change frequently. For example, high ambient air temperatures negatively affect the power output of a gas turbine, while lower temperatures facilitate its operation. To address these fluctuations, it is customary to convert the results to standard day conditions, which implies a temperature of 15°C, an atmospheric pressure of 101,325 Pa, and 0% relative humidity. This conversion is performed by applying specific equations to the relevant variables, which include specific fuel consumption, delivered power, and fuel flow.

This algorithm was developed using the App Designer tool, which is included in the design tools offered by the Matlab programming language. It supports the ability to extract the performance of three types of gas turbines from the Allison T56 family: the T56-A-15, 156-4-14, and 156-A-7B. Certification of the results could not be omitted, as they were compared with those produced by the currently used program of the Hellenic Aerospace Industry (HAI).

Finally, a parametric study was conducted to examine the variation, either individually or in combination, of all types of parameters involved in Performance, with the aim of identifying those variables that significantly influence the final performance of the gas turbine. For this purpose, a large number of 2D and 3D diagrams were

presented, which demonstrate the influence exerted by each variable and depict whether or not this influence is significant.

To carry out the parametric analysis, all elements were increased or decreased by 5% from their initial values, and the percentage change in the behavior of the corrected values of s.f.c., TMHP, and FF was recorded using diagrams. Taking the study a step further, the most significant measured variables were identified, and their combined influence was re-examined, maintaining the 5% variation.

Περιεχόμενα

Πίνακας Συμβόλων	13
Τίτλοι Σχημάτων	15
Τίτλοι Πινάκων	20
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	21
1.1. Τί είναι Αεριοστρόβιλος	21
1.2. Κύρια τμήματα ενός αεριοστρόβιλου.....	21
1.2.1. Τμήμα Εισαγωγής (Air Inlet)	22
1.2.2. Συμπιεστής (Compressor)	22
1.2.3. Διαχύτης (Diffuser)	23
1.2.4. Θάλαμος Καύσης (Combustion Chamber)	23
1.2.5. Στρόβιλος (Turbine)	24
1.2.6. Σύστημα Εξαγωγής – Ακροφύσιο (Exhaust nozzle)	25
1.3. Κύριοι τύποι αεριοστροβίλων	26
1.3.1. Θερμοδυναμικός κύκλος Brayton.....	26
1.3.2. Ελικοστρόβιλος (Turboprop).....	27
1.3.3. Αξονοστρόβιλος (Turboshaft).....	29
1.3.4. Στροβιλοαντιδραστήρας (Turbojet)	31
1.3.5. Στροβιλοανεμιστήρας (Turbofan).....	32
1.4. Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας)	34
1.5. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	36
Κεφάλαιο 2: Μεγέθη Επιδόσεων και Διόρθωση Μετρήσεων	37
2.1. Μεγέθη Επιδόσεων	37
2.1.1. Ονομαστική Ισχύς – Πραγματική Ισχύς	37
2.1.2. Ροπή (Torque)	38
2.1.3. Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου (Specific Fuel Consumption-s.f.c.)	38

2.1.4. Ροή Καυσίμου (Fuel Flow-FF)	39
2.1.5. Θερμοκρασίες και Πιέσεις Ψυχρού και Θερμού Τμήματος	40
2.1.6. Μετρήσεις Κραδασμών (Vibrations Survey)	41
2.2. Ονομαστικές και Ελάχιστες Επιδόσεις.....	41
2.3. Επίδραση των Ατμοσφαιρικών Συνθηκών στις Επιδόσεις και Απαίτηση Διόρθωσης Αυτών για Σύγκριση.....	42
2.4. Μετρούμενα Μεγέθη Υπολογισμού Επιδόσεων	44
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση και Λειτουργία Ελικοστρόβιλου Κινητήρα: Χαρακτηριστικά και Έλεγχος Απόδοσης.....	46
3.1. Ο Ελικοστρόβιλος Κινητήρας	46
3.2. Χρήση και Χαρακτηριστικά Λειτουργίας T56-A-15.....	51
3.3. Διαδικασία Ελέγχου Επιδόσεων	53
3.4. Περιγραφή της Διαδικασίας Δοκιμής	55
Κεφάλαιο 4: Διαδικασία Υπολογισμού Επιδόσεων	57
4.1. Οφέλη Χρήσης Λογισμικού.....	58
4.2. Μετρούμενα Μεγέθη και Διορθώσεις Αυτών.....	59
4.3. Ανάπτυξη Λογισμικού Υπολογισμού Επιδόσεων	62
4.3.1. Ανάπτυξη Κωδίκων για τους Τρεις Τύπους της Σειράς Allison T56... 63	
4.3.2. Ανάπτυξη Αλγορίθμου Προσομοίωσης Δοκιμής Κάνοντας Χρήση του App Designer στο Matlab	74
4.3.3. Πιστοποίηση Λογισμικού.....	82
Κεφάλαιο 5: Επίδραση Μετρούμενων Μεγεθών στον Υπολογισμό Επιδόσεων	84
5.1. Παραμετρική Ανάλυση Μετρούμενων Μεγεθών.....	86
5.1.1. Πίεση στην Είσοδο του Συμπιεστή (Pt ₂)	86
5.1.2. Πίεση Αναφοράς Δοκιμαστηρίου ή (Ps ₇).....	89
5.1.3. Θερμοκρασία Εισερχόμενου Αέρα στον Συμπιεστή (CIT)	92
5.1.4. Πίεση Συμπιεσμένου Αέρα στην Έξοδο του Συμπιεστή (CDP).....	94
5.1.5. Παραγόμενη Ροπή (Torque)	97

5.1.6. Θερμοκρασία Εισόδου Αέρα στον Στρόβιλο (TIT)	99
5.1.7. Ειδικό Βάρος Καυσίμου (Lab SG)	102
5.1.8. Θερμογόνος Δύναμη Καυσίμου (Fuel LHV)	104
5.1.9. Observed Τιμή της Ροής του Καυσίμου	106
5.2. Προσδιορισμός Σημαντικότερων Μετρούμενων Παραμέτρων και Συνδυασμένη Μεταβολή	108
5.2.1. Συνδυασμένη Μεταβολή P_{t2} και P_{s7}	109
5.2.2. Συνδυασμένη Μεταβολή Θερμοκρασίας Εισόδου Αέρα στον Στρόβιλο (TIT) και Ροπής (Torque)	113
5.2.3. Συνδυασμένη Μεταβολή OSB FF και Κατώτερης Θερμογόνου Δύναμης καυσίμου (Fuel LHV).....	117
5.2.4. Συνδυασμένη Μεταβολή Ειδικού Βάρους Καυσίμου (Lab SG) και Κατώτερης Θερμογόνου Δύναμης (Fuel LHV)	121
Κεφάλαιο 6: Ανακεφαλαίωση/Συμπεράσματα/Προτάσεις	125
6.1. Ανακεφαλαίωση.....	125
6.2. Συμπεράσματα.....	127
6.3. Προτάσεις	128

Πίνακας Συμβόλων

IGV	Inlet Guide Veins - Καθοδηγητικά πτερύγια
TIT ή Tts	Turbine Inlet Temperature - Θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα στον στρόβιλο
RGB	Reduction Gear Box - Μειωτήρας στροφών
ft	Πόδια – Μονάδα μέτρησης ύψους (Imperial System of Measurements)
EPR	Engine Pressure Ratio – Λόγος συμπίεσης του κινητήρα
ΠΑ	Πολεμική Αεροπορία
ICAO	International Civil Aviation Organization – Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας
EAB	Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία
lbf	Μονάδα μέτρησης δύναμης – round-force. Η δύναμη που χρειάζεται να επιταχύνει μια μάζα 1 λίβρας (lb) με την επιτάχυνση της βαρύτητας (32.174 ft/s^2).
in-lbs	Μονάδα μέτρησης της ροπής (torque). Η δύναμη που εφαρμόζεται σε λίβρες (pounds, lbs) για να περιστραφεί ένα αντικείμενο γύρω από έναν άξονα που απέχει από αυτόν δεδομένη απόσταση μετρημένη σε in (inches)
s.f.c	Specific Fuel Consumption – Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου
hp	Horse Power – Ιπποδύναμη, Μονάδα μέτρησης ισχύος
shp	Revolution Per Minute
kW	Κιλοβάτ- Μονάδα μέτρησης ισχύος στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI).
CIT	Compressor Inlet Temperature – Θερμοκρασία αέρα στην είσοδο του συμπιεστή.
TSFC	Thrust Specific Fuel Consumption.
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption.
\dot{m}_f	Ροή μάζας καυσίμου
F	Παραχθείσα δύναμη ώσης
f	Λόγος καυσίμου-αέρα (fuel to air ratio)
F_s	Ειδική ώση

psig	Pounds per Square Inch Gauge – Αναφέρεται στην πίεση που μετράται σε σχέση με την ατμοσφαιρική.
RPM	Στροφές ανά λεπτό
Lab SG	Specific Gravity – Ειδική Βαρύτητα
BTU/lb	Ποσότητα θερμικής ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την καύση ανά λίβρα μάζας καυσίμου.
RGB	Reduction Gearbox – Μειωτήρας Στροφών
ESHP	Equivalent Shaft Horse Power

Τίτλοι Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Απεικόνιση του ανοιχτού θερμοδυναμικού κύκλου Brayton (Simon Fraser University)	28
Σχήμα 1.2. Σχηματική Απεικόνιση Ελικοστρόβιλου κινητήρα (Alexander D. Baxter, Fredric F.Ehrich - Britannica, 2024)	29
Σχήμα 1.3. Ελικοστρόβιλος κινητήρας Allison T56, τοποθετημένος εντός δοκιμαστηρίου (ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε.)	29
Σχήμα 1.4. Σχηματική αναπαράσταση αξονοστρόβιλου κινητήρα (Alexander D. Baxter, Fredric F.Ehrich - Britannica, 2024)	30
Σχήμα 1.5. Lycoming T-53-L9 Turboshaft engine (National Air and Space Museum, n.d.)	31
Σχήμα 1.6. Agusta Bell-205 (ΠΟΛΕΜΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑ)	31
Σχήμα 1.7. Σχηματική αναπαράσταση στροβιλοαντιδραστήρα (MTU Aero Engines, 2024)	32
Σχήμα 1.8. J79-GE-17 Turbojet engine (GENERAL ELECTRIC)	33
Σχήμα 1.9. Σχηματική αναπαράσταση στροβιλοανεμιστήρα (Alexander D. Baxter, Fredric F.Ehrich - Britannica, 2024)	34
Σχήμα 1.10. Κινητήρας F110-GE-129 τοποθετημένος εντός δοκιμαστηρίου. Διακρίνεται η κλίνη δοκιμής του ή αλλιώς adapter sling (ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε.)	34
Σχήμα 1.11. Κινητήρας TF33, (Pratt & Whitney)	35
Σχήμα 3.1. Κινητήρας PT6-TWIN (Pratt & Whitney)	50
Σχήμα 3.2. Κινητήρας PW-100 (Pratt & Whitney)	50
Σχήμα 3.2. Κινητήρας PW-100 (Pratt & Whitney)	51
Σχήμα 3.4. C-130H Hercules (ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε.)	52
Σχήμα 3.5. Κινητήρας T56-A-15 (NATO)	52
Σχήμα 3.6. Κινητήρας T56-A-15 (NATO)	54
Σχήμα 4.1. Τμήμα του κώδικα για την δημιουργία των αρχικών πινάκων όλων των μεταβλητών ενδιαφέροντος	64
Σχήμα 4.2. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής της μεταβλητής TIT	65
Σχήμα 4.3. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής των P_{t2} και P_{s7}	66

Σχήμα 4.4. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής των CIT και CDP.....	66
Σχήμα 4.5. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής των Torque και Fuel Temp TF.....	67
Σχήμα 4.6. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής του OBS_FF	67
Σχήμα 4.7. Τμήμα του κώδικα για την δημιουργία του επόμενου σει πινάκων όλων των μεταβλητών ενδιαφέροντος	68
Σχήμα 4.8. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή επόμενων τιμών της μεταβλητής PIT	69
Σχήμα 4.9. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή επόμενων τιμών των Pt ₂ και Ps ₇	69
Σχήμα 4.10. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της επόμενων τιμών των CIT και CDP	70
Σχήμα 4.11. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή επόμενων τιμών των Torque και Fuel Temp TF	70
Σχήμα 4.12. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή επόμενων τιμών του OBS_FF.....	71
Σχήμα 4.13. Τελικοί Πίνακες	72
Σχήμα 4.14. Εκτέλεση κώδικα με εισαγωγή δεδομένων στο Command window (a.)	73
Σχήμα 4.15. Εκτέλεση κώδικα με εισαγωγή δεδομένων στο Command window (b.)	74
Σχήμα 4.16. Αρχικό Μενού.....	75
Σχήμα 4.17. Συμπλήρωση των απαιτούμενων πληροφοριών και επιλογή μελέτης που θα ακολουθηθεί.....	76
Σχήμα 4.18. Συμπλήρωση των των σταθερών παραμέτρων στην αρχή της δοκιμής.....	77
Σχήμα 4.19. Συμπλήρωση των πινάκων	78
Σχήμα 4.20. Μήνυμα Σφάλματος που ενημερώνει τον χρήστη ότι το κουμπί transfer δεν λειτουργεί αν ο προσωρινός πίνακας είναι άδειος	78
Σχήμα 4.21. Μήνυμα Σφάλματος που ενημερώνει τον χρήστη ότι το ο μόνιμος πίνακας δεν μπορεί να είναι άδειος	79
Σχήμα 4.22. Μήνυμα Σφάλματος που ενημερώνει τον χρήστη για μη έγκυρη καταχώρηση τιμής.....	79

Σχήμα 4.23. Η συμπληρωμένη μορφή του Cumulative Table.....	80
Σχήμα 4.24. Compressor Status	81
Σχήμα 4.25.Καρτέλα Performance Results.....	82
Σχήμα 5.1 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της P_{t2}	89
Σχήμα 5.2 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της P_{t2}	89
Σχήμα 5.3 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της P_{t2}	90
Σχήμα 5.4 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της P_{s7}	91
Σχήμα 5.5 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της P_{s7}	92
Σχήμα 5.6 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της P_{s7}	92
Σχήμα 5.7 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της CIT	94
Σχήμα 5.8 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της CIT.....	94
Σχήμα 5.9 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της CIT	95
Σχήμα 5.10 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της CDP.	96
Σχήμα 5.11 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της CDP....	96
Σχήμα 5.12 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της CDP.....	97
Σχήμα 5.13 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της Ροπής	98
Σχήμα 5.14 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της Ροπής .	99
Σχήμα 5.15 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της Ροπής.....	99
Σχήμα 5.16 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της TIT	100
Σχήμα 5.17 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της TIT ...	101
Σχήμα 5.18 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της TIT	101
Σχήμα 5.19 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει του Lab SG.....	103
Σχήμα 5.20 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της Lab SG	104
Σχήμα 5.21 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της Lab SG	104
Σχήμα 5.22 Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει του Fuel LHV..	105
Σχήμα 5.23: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της Fuel LHV	106
Σχήμα 5.24: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της Fuel LHV .	106
Σχήμα 5.25: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει του OBS FF....	107

Σχήμα 5.26: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της OBS FF	108
Σχήμα 5.27: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της OBS FF	108
Σχήμα 5.28: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των P_{t2} και P_{s7} , με αύξηση της P_{t2} και ταυτόχρονη μείωση της P_{s7}	111
Σχήμα 5.29: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των P_{t2} και P_{s7} , με αύξηση της P_{t2} και ταυτόχρονη μείωση της P_{s7}	111
Σχήμα 5.30: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των P_{t2} και P_{s7} , με αύξηση της P_{t2} και ταυτόχρονη μείωση της P_{s7}	112
Σχήμα 5.31: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των P_{t2} και P_{s7} , με ταυτόχρονη μείωση της P_{t2} και P_{s7}	112
Σχήμα 5.32: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των P_{t2} και P_{s7} , με ταυτόχρονη μείωση της P_{t2} και P_{s7}	113
Σχήμα 5.33: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των P_{t2} και P_{s7} , με ταυτόχρονη μείωση της P_{t2} και P_{s7}	113
Σχήμα 5.34: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των TIT και Torque, με αύξηση της Torque και ταυτόχρονη μείωση της TIT.	115
Σχήμα 5.35: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των TIT και Torque, με αύξηση της Torque και ταυτόχρονη μείωση της TIT	115
Σχήμα 5.36: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των TIT και Torque, με αύξηση της Torque και ταυτόχρονη μείωση της TIT	116
Σχήμα 5.37: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των TIT και Torque, με ταυτόχρονη μείωση της Torque και της TIT	116
Σχήμα 5.38: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των TIT και Torque, με ταυτόχρονη μείωση της Torque και της TIT	117
Σχήμα 5.39: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των TIT και Torque, με ταυτόχρονη μείωση της Torque και της TIT	117
Σχήμα 5.40: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με αύξηση της OBS FF και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.	119
Σχήμα 5.41: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με αύξηση της OBS FF και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.	119
Σχήμα 5.42: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με αύξηση της OBS FF και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.	120
Σχήμα 5.43: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της OBS FF και της Fuel LHV.	120

Σχήμα 5.44: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της OBS FF και της Fuel LHV.	121
Σχήμα 5.45: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της OBS FF και της Fuel LHV.	121
Σχήμα 5.46: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με αύξηση της Lab SG και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.	123
Σχήμα 5.47: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με αύξηση της Lab SG και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.	123
Σχήμα 5.48: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με αύξηση της Lab SG και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.	124
Σχήμα 5.49: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της Lab SG και της Fuel LHV.	124
Σχήμα 5.50: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της Lab SG και της Fuel LHV.	125
Σχήμα 5.51: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της Lab SG και της Fuel LHV.	125

Τίτλοι Πινάκων

Πίνακας 4.1 Πιστοποίηση αποτελεσμάτων	82
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της Pt ₂	86
Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της Ps ₇	89
Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της CIT	92
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της CDP.....	94
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της Torque	97
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της TIT	99
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της Lab SG	102
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της Fuel LHV	104
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της OBS FF.	106
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% των Pt ₂ και Ps ₇ (a)	109
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των Pt ₂ και Ps ₇ (b)	109
Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των TIT και Ροπήs (α)	113
Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των TIT και Ροπήs (b)	113
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των OBS FF και Fuel LHV (α).....	117
Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των OBS FF και Fuel LHV (b)	117
Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των Lab SG και Fuel LHV (α).....	121

Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των Lab SG και Fuel LHV (b)..... 121

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Τί είναι Αεριοστρόβιλος

Ο αεριοστρόβιλος αποτελεί μια εξαιρετικά σημαντική και ευρέως διαδεδομένη θερμική μηχανή η οποία βρίσκει χρήση σε ποικίλους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, από την παραγωγή ενέργειας και τις μεταφορές έως και πιο εξειδικευμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Πρόκειται για μια μηχανή εσωτερικής καύσης συνεχόμενης έγχυσης καυσίμου. Ως μηχανή εσωτερικής καύσης εννοείται μια θερμική μηχανή η οποία μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου αρχικά σε θερμότητα και τελικά σε μηχανικό έργο. Η παραγωγή της θερμότητας επιτυγχάνεται από τη διεργασία καύσης του καυσίμου σε ειδικά κατασκευασμένο χώρο, τον θάλαμο καύσης, με τη βοήθεια κάποιου οξειδωτικού, το οποίο στην περίπτωση των αεριοστρόβιλων πρόκειται για τον ατμοσφαιρικό αέρα. Στη συνέχεια, η θερμότητα μετατρέπεται σε μηχανικό έργο μέσω κάποιου κινηματικού μηχανισμού. Η παραγωγή της θερμότητας και η παραγωγή μηχανικού έργου συμβαίνουν ουσιαστικά στον ίδιο χώρο της μηχανής και άρα δεν απαιτείται η μεταφορά της θερμότητας διαμέσου κάποιας επιφάνειας αλλά ούτε και η χρήση κάποιου επιπλέον ρευστού λειτουργείας.

1.2. Κύρια τμήματα ενός αεριοστρόβιλου

Παρά την ύπαρξη διαφορετικών τύπων αεριοστροβίλων, όλοι οι κινητήρες μοιράζονται ορισμένα κοινά τμήματα: την εισαγωγή, τον συμπιεστή, τον διαχύτη, τον θάλαμο καύσης, τον στρόβιλο και τέλος το ακροφύσιο.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος αποτελεί το εργαζόμενο μέσο, εισέρχεται διαμέσου της εισαγωγής (air inlet) της μηχανής στον συμπιεστή (compressor), όπου επιτυγχάνεται αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας, καθώς αυτός διέρχεται από τις διάφορες βαθμίδες. Προτού εισχωρήσει στον θάλαμο καύσης, ο συμπιεσμένος αέρας ρέει από το κομμάτι του διαχύτη (diffuser), ο οποίος επιτελεί διττό ρόλο. Αφενός αποτελεί ένα δομικό κομμάτι, το οποίο παρέχει ένα σημείο στήριξης του κινητήρα πάνω στο αεροσκάφος, αφετέρου λόγω της μορφής του αποκλίνοντος αγωγού που διαθέτει, επιβραδύνει το ρευστό πριν την καύση του, ούτως ώστε αυτή να πραγματοποιηθεί με τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο. Σειρά έχει ο θάλαμος καύσης (combustion chamber), όπου διαμέσου της καύσης, προστίθεται ενέργεια στον αέρα, ώστε κατά την έξοδό του να έχει δημιουργηθεί ένα μίγμα υψηλής θερμοκρασίας. Το μίγμα που έχει σχηματιστεί, το οποίο δεν είναι τίποτα άλλο παρά θερμά καυσαέρια, εισέρχεται στον στρόβιλο (turbine), όπου εκτονώνεται παράγοντας έργο. Μετά την τελευταία κινητή βαθμίδα του στροβίλου, τα καυσαέρια διαμέσου του ακροφυσίου (exhaust nozzle) διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα.

Μέρος του παραγόμενου έργου χρησιμοποιείται για την περιστροφή του συμπιεστή ενώ το υπόλοιπο συμβάλει στην αύξηση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων ή αποδίδεται για την κίνηση της έλικας αν πρόκειται για αεροπορικό

αεροστρόβιλο ή την κίνηση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας αν πρόκειται για βιομηχανικό. Επιπλέον, μέρος του έργου χρησιμοποιείται και για την κίνηση των παρελκόμενων του κινητήρα, όπως αντλίες καυσίμου και λαδιού, κιβώτια ταχυτήτων, ρυθμιστές, φίλτρα καυσίμου και λαδιού.

1.2.1. Τμήμα Εισαγωγής (Air Inlet)

Ο ρόλος που επιφορτίζεται το τμήμα της εισαγωγής του κινητήρα ουσιαστικά είναι η κατεύθυνση του ατμοσφαιρικού αέρα στον συμπιεστή με τον μικρότερο δυνατό βαθμό απωλειών, σε οποιαδήποτε φάση της πτήσης. Παρότι η συμπίεση του εισερχόμενου αέρα πραγματοποιείται κατά κράτος στο τμήμα του συμπιεστή, αξίζει να σημειωθεί πως ακόμη και στο τμήμα της εισαγωγής συντελείται κατά ένα μικρό ποσοστό μια πρώτη συμπίεση. Λόγω της ιδιαίτερης μορφολογίας του αποκλίνοντος ακροφυσίου επιτυγχάνεται αυτή η προκαταρκτική αύξηση της πίεσης και πιο συγκεκριμένα της στατικής, μέσω της επιβράδυνσης της ροής, λίγο πριν αυτή εισέλθει στο τμήμα του συμπιεστή. Σε αρκετές περιπτώσεις, για τη διευκόλυνση της καθοδήγησης του αέρα και της εξομάλυνσής του πριν οδηγηθεί στον συμπιεστή, συναντώνται ειδικές γεωμετρικές διατάξεις, τα λεγόμενα καθοδηγητικά πτερύγια (Inlet Guide Vanes – IGV).

1.2.2. Συμπιεστής (Compressor)

Ο εισερχόμενος, στον κινητήρα, αέρας, εξερχόμενος από το τμήμα της εισαγωγής, εισέρχεται στη μονάδα του συμπιεστή. Ο συμπιεστής ενός αεροστρόβιλου αποτελείται από έναν συγκεκριμένο αριθμό βαθμίδων και η κάθε βαθμίδα αποτελείται από μια σειρά κινητών πτερυγίων ακολουθούμενη από μια σειρά σταθερών. Τα κινητά πτερύγια δίνουν ενέργεια στο ρευστό αυξάνοντας την ταχύτητά του, ενώ τα σταθερά το επιβραδύνουν κάνοντας ανάκτηση στατικής πίεσης. Επιδίωξη δεν είναι η επίτευξη υψηλών ταχυτήτων του εργαζόμενου μέσου, αλλά η αύξηση της πίεσής του.

Ο ρυθμός επιβράδυνσης που μπορεί να επιτύχουν τα σταθερά πτερύγια κυμαίνεται στο 72% σύμφωνα με την αρχή του de Haller (Fritsche, 2024), καθότι η περίπτωση μεγαλύτερου ποσοστού επιβράδυνσης, θα οδηγήσει σε αποκόλληση της ροής στα σταθερά πτερύγια με συνέπεια τη μη σωστή λειτουργία του συμπιεστή.

Ο αριθμός των υπαρχουσών βαθμίδων διαφέρει σε κάθε τύπο κινητήρα και εξαρτάται: 1) από την απαιτούμενη συνολική πίεση (pressure ratio), συνήθως υψηλότερος λόγος συμπίεσης απαιτεί και μεγαλύτερο αριθμό βαθμίδων, 2) από την αναγκαία απόδοση του συμπιεστή, 3) από τους διάφορους θερμοδυναμικούς περιορισμούς, όπως για παράδειγμα κάποιο θερμοκρασιακό όριο το οποίο δεν πρέπει να υπερκεραστεί και 4) φυσικά ανάλογα με τον τύπο του, αν πρόκειται δηλαδή για έναν αξονικό (axial) συμπιεστή ή αν ανήκει στην κατηγορία των φυγοκεντρικών (centrifugal).

Η διαφορά μεταξύ των δύο τύπων, αξονικού και φυγοκεντρικού, έγκειται στη διαφοροποίηση της διεύθυνσης της ροής του αέρα καθώς διέρχεται μέσα από τη

μονάδα. Στην περίπτωση του αξονικού συμπιεστή η ροή είναι παράλληλη προς τον άξονά του με αποτέλεσμα ο αέρας να εισέρχεται και να εξέρχεται κατά μήκος της ίδιας γραμμής ενώ για την περίπτωση του φυγοκεντρικού, η ροή του αέρα είναι κάθετη προς τον άξονά του, όπου κατά συνέπεια εισέρχεται ακτινικά και στη συνέχεια εκτρέπεται προς τα έξω εξαιτίας της δημιουργίας φυγοκεντρικών δυνάμεων. Ουσιαστικά ο συμπιεσμένος αέρας εξέρχεται ακτινικά από την περιφέρεια του δίσκου.

Οι αξονικοί συμπιεστές έχουν υψηλές αποδόσεις και μπορούν να επιτύχουν μεγάλους λόγους πίεσεων χρησιμοποιώντας πολλαπλές βαθμίδες, ενώ παράλληλα είναι κατάλληλοι για τη διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων αέρα και υψηλών ταχυτήτων ροής. Συνήθως συναντώνται σε μεγάλο μέγεθος αεριοστροβίλους, όπου οι απαιτήσεις συμπίεσης του ρευστού είναι αρκετά αυξημένες.

Εν αντιθέσει με τους αξονικούς, οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές, έχουν χαμηλότερες αποδόσεις και είναι καταλληλότεροι σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτούνται μεγάλες ταχύτητες του εργαζόμενου μέσου και που επιτυγχάνονται υψηλότερες πιέσεις κάνοντας χρήση πολύ λιγότερων βαθμίδων.

Κατά γενική περίπτωση, παρότι οι αξονικοί συμπιεστές θεωρείται πως έχουν επικρατήσει έναντι των φυγοκεντρικών σε πλειάδα βιομηχανικών και αεροπορικών εφαρμογών, η επιλογή του κατάλληλου συμπιεστή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα κάθε εφαρμογής.

1.2.3. Διαχύτης (Diffuser)

Συνεχίζοντας το ταξίδι του, ο συμπιεσμένος αέρας αφότου εξέλθει από την τελευταία βαθμίδα του συμπιεστή και τα τελευταία ακίνητα περύγια, θα συναντήσει τον διαχύτη. Όπως αναφέρθηκε, αποτελεί δομικό κομμάτι του κινητήρα προσφέροντας ένα σημείο στήριξής του με το σώμα του αεροσκάφους. Ταυτόχρονα επιβραδύνει το ρευστό χάρη στην αποκλίνουσα γεωμετρία του και συμβάλει στην αύξηση της στατικής πίεσης.

1.2.4. Θάλαμος Καύσης (Combustion Chamber)

Οι θάλαμοι καύσης ανάλογα με την μορφολογία τους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- a) Τον πολλαπλό (multiple chamber)
- b) Τον δακτυλιοειδή (annular combustion chamber)
- c) Τον σωληνοδακτυλιοειδή (can annular combustion chamber)

Ο πολλαπλός θάλαμος καύσης συναντάται κυρίως σε παλαιότερης τεχνολογίας αεριοστροβίλους. Ο δακτυλιοειδής θάλαμος καύσης είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος στη σύγχρονη εποχή καθότι συνδυάζει με τον πλέον αποτελεσματικότερο τρόπο τρεις εξαιρετικά σημαντικές παραμέτρους, τον βαθμό απόδοσης, το βάρος και το μέγεθος. Τέλος, ο σωληνοδακτυλιοειδής θάλαμος, συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των πρώτων δύο τύπων.

Κατά μήκος του σώματος των θαλάμων καύσεων παρατηρούνται οπές, όπου κάποιες από αυτές χρησιμεύουν για την εισαγωγή του αέρα από τον diffuser, συνήθως εκείνες που είναι τοποθετημένες στο εμπρόσθιο τμήμα του θαλάμου. Στο πρώτο κομμάτι του θαλάμου καύσης λαμβάνει χώρα η στοιχειομετρική καύση και οι θερμοκρασίες (θερμοκρασίες αδιαβατικής φλόγας) που επιτυγχάνονται από τη εξώθερμη αντίδραση ανέρχονται περίπου στους 2000°C με 2100°C (Sakhrieh, 2019). Ωστόσο στο εξωτερικό περίβλημα, υπάρχουν επιπλέον οπές μικρής διαμέτρου, από τις οποίες εισέρχεται ο ψυχρός αέρας που ρέει εξωτερικά του θαλάμου καύσης και που συμβάλει στην επιθυμητή ψύξη του μίγματος. Το μίγμα πλέον βρίσκεται στην κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να εξέλθει από τον θάλαμο καύσης, να συναντήσει την πρώτη βαθμίδα του στροβίλου και στη συνέχεια να εκτονωθεί στις επόμενες βαθμίδες, παράγοντας το επιθυμητό μηχανικό έργο.

1.2.5. Στρόβιλος (Turbine)

Καθώς τα καυσαέρια απομακρύνονται από τον θάλαμο καύσης συναντούν την πρώτη βαθμίδα του στροβίλου. Κάθε βαθμίδα αποτελείται από μια σειρά σταθερών πτερυγίων ακολουθούμενα από μια σειρά κινητών. Η τιμή της θερμοκρασίας των παραγόμενων καυσαερίων αφότου αυτά έρθουν σε επαφή με την πρώτη σειρά σταθερών πτερυγίων (Turbine Inlet Temperature – TIT) είναι εξαιρετικής σημασίας για την αποδιδόμενη ισχύ και θεωρείται μια κρίσιμη παράμετρος για την αποδοτικότητα του στροβίλου και κατά συνέπεια του συνόλου του κινητήρα.

Ο στρόβιλος εκτελεί ακριβώς την αντίθετη λειτουργία από αυτή του συμπιεστή. Αναλαμβάνει την εκτόνωση του εισερχόμενου αέρα με σκοπό την μείωση της πίεσης και της αύξησης της ταχύτητάς του για την παραγωγή μηχανικού έργου. Εκμεταλλεζόμενος την κινητική ενέργεια των καυσαερίων παράγει την απαιτούμενη ισχύ με την οποία τροφοδοτεί τον συμπιεστή και πληθώρα άλλων εξαρτημάτων του κινητήρα.

Ο αριθμός των βαθμίδων του στροβίλου είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο αριθμό του συμπιεστή. Αυτό συμβαίνει, διότι τα κινητά πτερύγια επιταχύνουν το ρευστό και λόγω του ότι δεν υπάρχει κάποιο όριο στην επιτάχυνση του εργαζόμενου μέσου, ο κίνδυνος αποκόλλησης της ροής εξαλείφεται.

Αξίζει να σημειωθεί, πως κατά μήκος του στροβίλου το ύψος των πτερυγίων αυξάνεται και κατά συνέπεια παρατηρείται αύξηση και στο εμβαδόν της διατομής του, ενώ στον συμπιεστή κατά την εξέλιξη της διεργασίας συμπίεσης του ρευστού, το ύψος και επομένως το εμβαδόν διατομής του, μειώνονται. Αυτό μπορεί να εξεξηγηθεί δεδομένου ότι στην περίπτωση του στροβίλου, το ζητούμενο είναι η μείωση της πίεσης του μίγματος με αποτέλεσμα τη μειούμενη μεταβολή της πυκνότητας. Κατ' αντιπαράθεση, στον συμπιεστή αύξηση της πίεσης, επιφέρει και αύξηση της πυκνότητας. Το εξαγόμενο συμπέρασμα μπορεί να δικαιολογηθεί κάνοντας χρήση της ακόλουθης μορφής της καταστατικής εξίσωσης: $PV = mRT$. Διαιρώντας κατά μέλη με την ποσότητα του όγκου προκύπτει ότι $P = \frac{m}{V}RT$, όπου το πηλίκο της μάζας προς τον όγκο δεν είναι τίποτα άλλο παρά η πυκνότητα του ρευστού. Επομένως, η

τελική μορφή της καταστατικής εξίσωσης μπορεί να γραφεί ως $P = \rho RT$, ενώ τέλος, λύνοντας ως προς την παράμετρο ρ προκύπτει ότι $\rho = P/RT$. Κατά τη συμπίεση του ρευστού η ραγδαία αύξηση της πίεσης έχει άμεση επιρροή στη συμπεριφορά της πυκνότητας και παρόλο που αυξάνεται και η θερμοκρασία λόγω της σύμπτυξης των μορίων του αέρα και γνωρίζοντας ότι αύξηση της θερμοκρασίας τείνει να έχει αρνητικό αντίκτυπο στην τιμή της πυκνότητας, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν θα προκύψουν σημαντικές μεταβολές γιατί η συνολική αύξηση της πίεσης έχει αρκετά μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Στον στρόβιλο, η θερμική ενέργεια των παραγόμενων καυσαερίων μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια με αρνητικές επιπτώσεις σε πίεση και πυκνότητα, ενώ παράλληλα παρατηρείται και μείωση της θερμοκρασίας τους η οποία θα ήταν δυνατό να επηρεάσει ανοδικά την τιμή της πυκνότητας, ωστόσο και σε αυτή την περίπτωση η μείωση της πίεσης υπερισχύει. Προχωρώντας ένα βήμα περισσότερο και γνωρίζοντας ότι η παροχή μάζας ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας επί την παροχή όγκου, $\dot{m} = \rho \dot{Q}$ και πως η παροχή όγκου ισούται με το γινόμενο της διατομής της ροής επί την ταχύτητά της, $\dot{Q} = Av$, εξάγεται η πολύ χρήσιμη σχέση για την παροχή μάζας: $\dot{m} = \rho Av$. Έχοντας επίγνωση ότι απαιτείται σταθερή παροχή αέρα για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα και πως η ταχύτητα του αέρα και των καυσαερίων πρέπει να μεταβάλλεται με τρόπο που να βελτιστοποιεί την απόδοση κύκλου, η αυξομείωση της πυκνότητας θα επιφέρει την ακριβώς αντίθετη μεταβολή της διατομής, με σκοπό τη διατήρηση της απαιτούμενης παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου. Άρα, σκόπιμα ο συμπιεστής έχει τη μορφή ενός συγκλίνοντος αγωγού ενώ ο στρόβιλος υιοθετεί μια αποκλίνουσα γεωμετρία.

1.2.6. Σύστημα Εξαγωγής – Ακροφύσιο (Exhaust nozzle)

Το σύστημα εξαγωγής οδηγεί τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα μετά την τελευταία σειρά σταθερών πτερυγίων του στρόβιλου. Ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα, αν πρόκειται για παράδειγμα για έναν στροβιλοαντιδραστήρα ή στροβιλοανεμιστήρα, τα καυσαέρια θα πρέπει να επιταχυνθούν με σκοπό την μεγιστοποίηση της κινητικής τους ενέργειας και τη μείωση της πίεσης σε επίπεδα ατμοσφαιρικής, με σκοπό την επίτευξη των απαιτούμενων ποσοστών παραγόμενης ώσης, ενώ στην περίπτωση ενός ελικοστρόβιλου κινητήρα εξαιτίας του ότι σχεδόν το 90% της παραγόμενης ενέργειας προσφέρεται για την κίνηση της έλικας και μόνο ένα 10% της ενέργειας των καυσαερίων είναι υπεύθυνο για την παραγωγή ώσης, το σύστημα εξαγωγής, απλώς θα μεταφέρει τα καυσαέρια στο περιβάλλον με τη μικρότερη δυνατή ταχύτητα.

1.3. Κύριοι τύποι αεροστροβίλων

Οι αεροστρόβιλοι που συναντώνται σε εφαρμογές αεροπορικής πρόωσης συνήθως ανήκουν σε μια από τις ακόλουθες οικογένειες κινητήρων:

1. Εμβολοφόρος - Μ.Ε.Κ.
2. Ελικοστρόβιλος - Turboprop engine
3. Άξονοστρόβιλος - Turboshaft engine
4. Στροβιλοαντιδραστήρας - Turbojet engine
5. Στροβιλοανεμιστήρας - Turbofan engine
6. Αθόδουλος – Ramjet

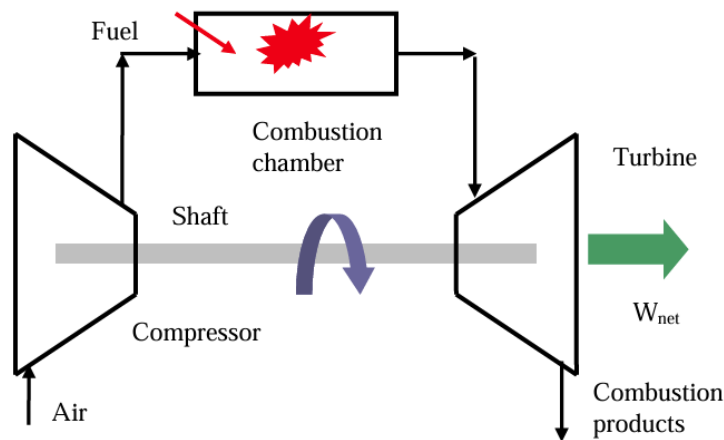
Οι τύποι των εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ και των κινητήρων Ramjet, συμβολίζουν τα δύο άκρα της εξελικτικής γραμμής των αεροκινητήρων. Στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, είτε χρησιμοποιώντας έναν στροβιλοανεμιστήρα για την παραγωγή πρόωσης ενός αεροσκάφους, είτε για την κίνηση ενός πλοίου, είτε ακόμα και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι κυριότεροι τύποι που απαντώνται είναι ο ελικοστρόβιλος, ο άξονοστρόβιλος, ο στροβιλοαντιδραστήρας και τέλος ο στροβιλοανεμιστήρας.

1.3.1. Θερμοδυναμικός κύκλος Brayton

Ανεξαρτήτως του τύπου, όλοι οι αεροστρόβιλοι στηρίζουν την αρχή λειτουργίας τους στον θερμοδυναμικό κύκλο του Brayton. Ο κύκλος Brayton μπορεί να μοντελοποιηθεί και για ανοιχτό και για κλειστό κύκλο. Στον ανοιχτό κύκλο τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον στρόβιλο απορρίπτονται στο περιβάλλον και δεν επανακυκλοφορούν μέσα στο σύστημα του κινητήρα ενώ στον κλειστό κύκλο αφού εφαρμοστεί η παραδοχή του πρότυπου αέρα και κρατώντας τις διεργασίες της συμπίεσης και της εκτόνωσης ίδιες, η διαφοροποίηση έγκειται σε δύο παράγοντες. Η διεργασία της καύσης θα πρέπει να αντικατασταθεί από μια εξωτερική πηγή προσθήκης θερμότητας και τα καυσαέρια μετά την εκτόνώσή τους στον στρόβιλο, θα πρέπει να ψυχθούν με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας πριν εισέλθουν εκ νέου στον συμπιεστή.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη αεροπορικών αεροστροβίλων, επομένως κύριο αντικείμενο μελέτης αποτελεί ο ανοιχτός κύκλος Brayton. Αποτελείται από μια ισεντροπική διεργασία συμπίεσης, όπου ο αέρας συμπιέζεται αδιαβατικά, ακολουθεί μια διεργασία ισοβαρούς προσθήκης θερμότητας, το μίγμα καυσαερίων στη συνέχεια εκτονώνεται αδιαβατικά (ισεντροπική εκτόνωση) και τέλος τα καυσαέρια αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα σε σταθερή πίεση απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον.

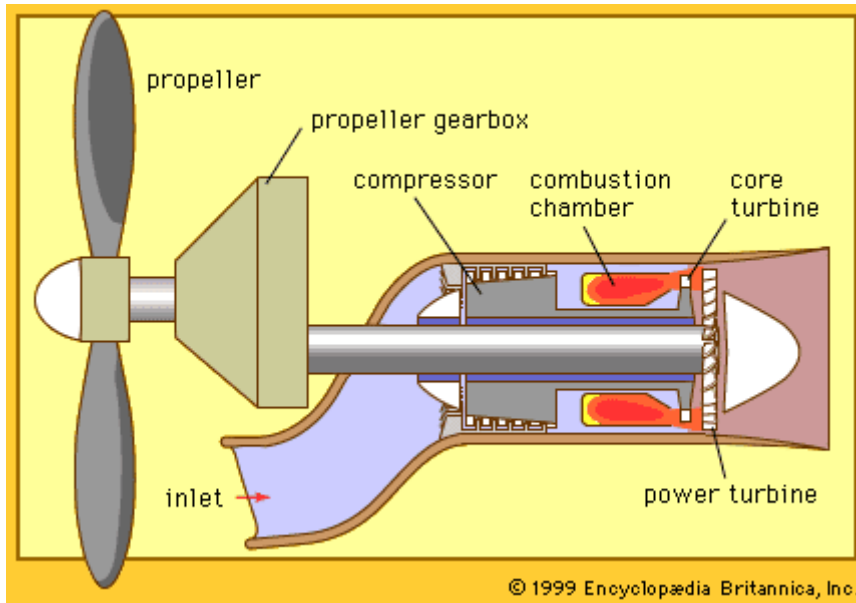
Open Gas-Turbine Cycle



Σχήμα 1.1 Απεικόνιση του ανοιχτού θερμοδυναμικού κύκλου Brayton
(Simon Fraser University)

1.3.2. Ελικοστρόβιλος (Turboprop)

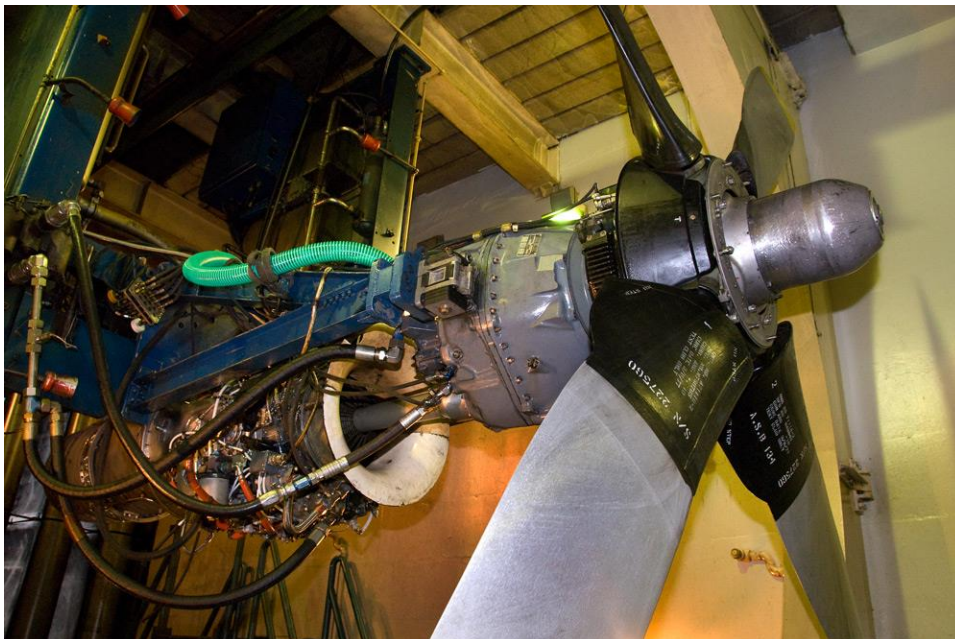
Ένας ελικοστρόβιλος κινητήρας περιλαμβάνει όλα τα βασικά τμήματα που προαναφέρθηκαν (συμπιεστής, θάλαμος καύσης, στρόβιλος) με τη σημαντική προσθήκη της έλικας στο μπροστινό μέρος του και ενός μειωτήρα στροφών ή αλλιώς RGB (Reduction Gear Box) που ουσιαστικά πρόκειται για ένα σύστημα γραναζιών. Όλες οι συνιστώσες τοποθετούνται περιμετρικά ενός κοινού άξονα. Ο στρόβιλος θα παράξει το απαιτούμενο μηχανικό έργο, ωστόσο η ταχύτητα περιστροφής του είναι αρκετά υψηλή για την άμεση κίνηση της έλικας, η οποία απαιτείται να περιστρέφεται σε χαμηλότερες στροφές για την αποδοτική της λειτουργία. Τη μείωση των στροφών αναλαμβάνει το RGB, όπου μεταβάλλει τις υψηλές και μη αποδεκτές στροφές του στρόβιλου, σε πιο χαμηλές και ανεκτές στροφές της έλικας. Ο μειωτήρας στροφών τοποθετείται στο εμπρόσθιο τμήμα του κινητήρα και πίσω από το τμήμα της έλικας.



Σχήμα 1.2. Σχηματική Απεικόνιση Ελικοστρόβιλου κινητήρα
(Alexander D. Baxter, Fredric F.Ehrich - Britannica, 2024)

Η ενέργεια των παραγόμενων καυσαερίων συμβάλει κατά ένα αρκετά μικρό ποσοστό στην παραγωγή ώσης με μόνο 10%, ενώ το υπόλοιπο 90% προσφέρεται για την κίνηση του άξονα, ο οποίος με τη σειρά του είναι υπεύθυνος για την κίνηση της προπέλας, η οποία επιταχύνει μεγάλες ποσότητες μάζας αέρα σε όχι και τόσο υψηλές ταχύτητες (Καρέλας Ευάγγελος, 2024). Η χρήση αυτού του είδους αεροστρόβιλου περιορίζεται σε υψόμετρα κάτω των 23.000 ft.

Ενδεικτικά, κάποια χαρακτηριστικά αεροσκάφη που φέρουν αυτού του είδους των κινητήρων, είναι τα αμερικανικής κατασκευής Lockheed C-130 Hercules, Lockheed P-3 Orion, το ρωσικής κατασκευής Antonov-An-22 κ.λπ.

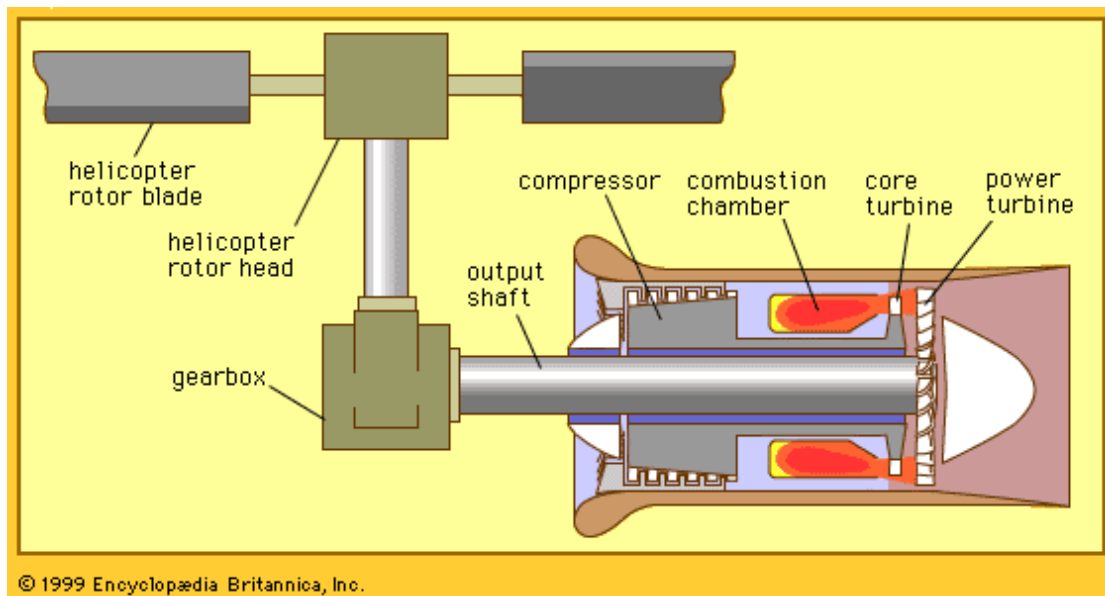


Σχήμα 1.3. Ελικοστρόβιλος κινητήρας Allison T56, τοποθετημένος εντός δοκιμαστηρίου
(ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε.)

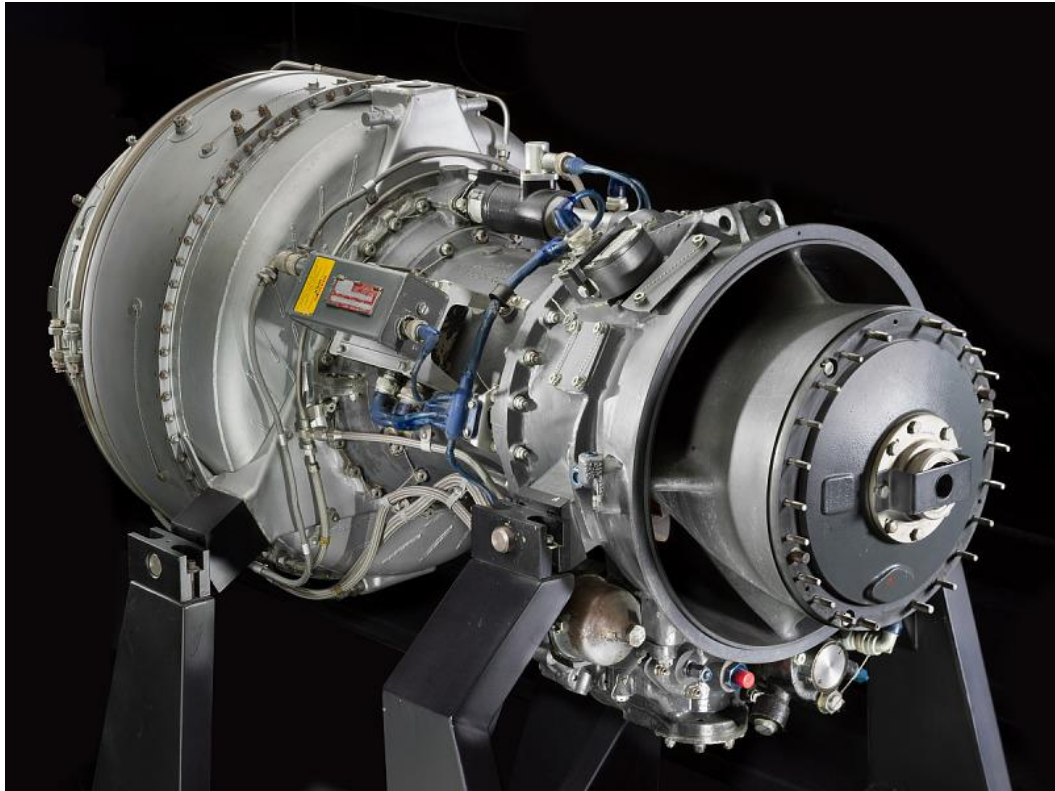
1.3.3. Αξονοστρόβιλος (Turboshaft)

Υπάρχει μεγάλη ομοιότητα ενός αξονοστρόβιλου με έναν ελικοστρόβιλο κινητήρα. Γίνεται χρήση τους κυρίως σε ελικόπτερα και σε βοηθητικές μονάδες ισχύος (auxiliary power units). Σε ένα ελικόπτερο ο στρόβιλος είναι συνδεδεμένος με τον άξονα του στροφείου του ελικοπτέρου παρέχοντας του τη ζητούμενη ισχύ. Η παραγόμενη από τα καυσαέρια ώση είναι ελάχιστη.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αξονοστρόβιλου κινητήρα είναι ο Lycoming T53, όπου συναντάται στο ελικόπτερο AB-205 της Πολεμικής Αεροπορίας (ΠΑ).



*Σχήμα 1.4. Σχηματική αναπαράσταση αξονοστρόβιλου κινητήρα
(Alexander D. Baxter; Fredric F.Ehrich - Britannica, 2024)*



Σχήμα 1.5. Lycoming T53-L-1 (LTC1B-1) Turboshaft Engine
(National Air and Space Museum, n.d.)



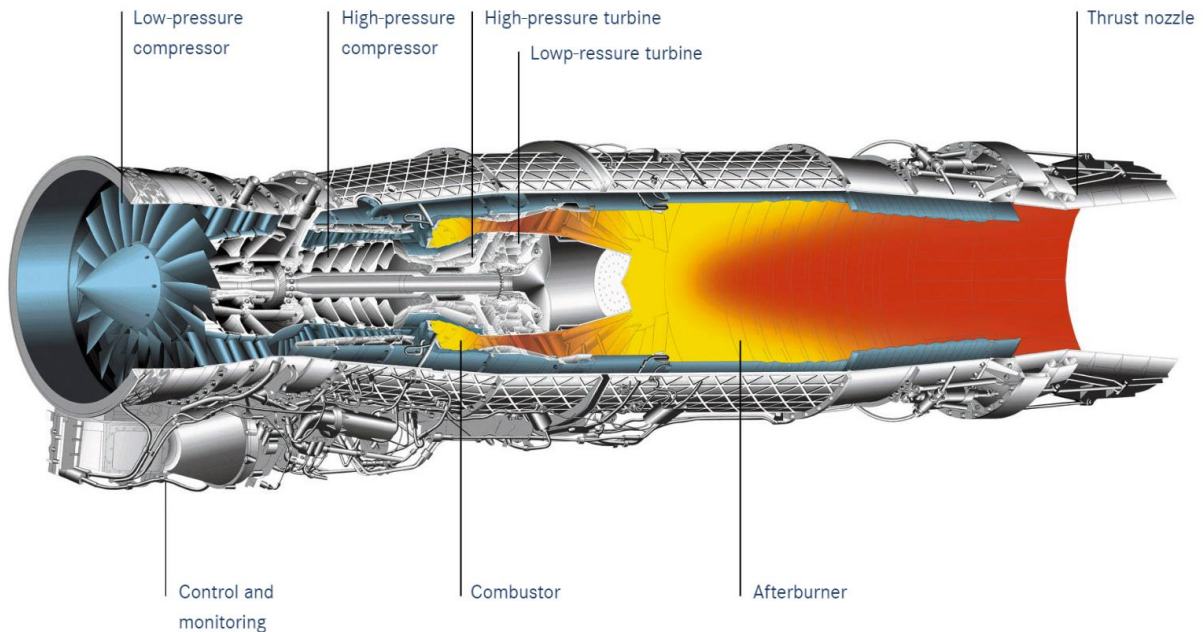
Σχήμα 1.6. Agusta Bell-205
(ΠΟΛΕΜΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑ)

1.3.4. Στροβιλοαντιδραστήρας (Turbojet)

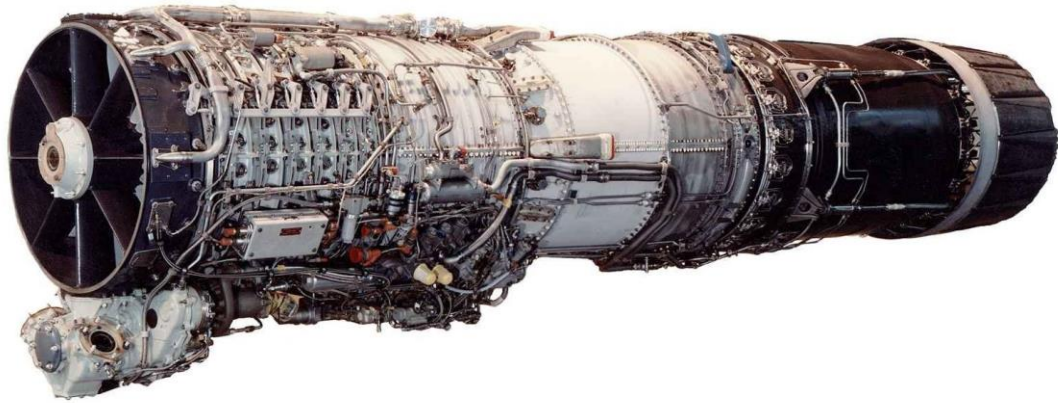
Η παραγωγή ώσης επιτυγχάνεται εξ ολοκλήρου από την εκτόνωση των καυσαερίων και τη μετέπειτα επιτάχυνσή τους στο σύστημα εξαγωγής του κινητήρα, σε αντίθεση με τους προηγούμενους δύο τύπους που εξετάστηκαν. Χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί ο λόγος συμπίεσης της μηχανής (engine pressure ratio – EPR), που μεταφράζεται ως το πηλίκο της πίεσης εξαγωγής των καυσαερίων και της πίεσης του εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα.

Παρότι αποτελεί σταθμό στην εξέλιξη των αεροστροβίλων, η χαμηλή του απόδοση σε μικρές ταχύτητες, ο υψηλός θόρυβος και η αρκετά μεγάλη κατανάλωση καυσίμου τον καθιστά πλέον έναν όχι τόσο διαδεδομένο τύπο σε αεροπορικές εφαρμογές.

Αντιπροσωπευτική οικογένεια κινητήρων αποτελούν οι θρυλικοί General Electric J-79, οι οποίοι συναντώνται στα αεροσκάφη McDonnell Douglas F-4 Phantom II.



*Σχήμα 1.7. Σχηματική αναπαράσταση στροβιλοαντιδραστήρα
(MTU Aero Engines, 2024)*



*Σχήμα 1.8. J79-GE-17 Turbojet engine
(GENERAL ELECTRIC)*

1.3.5. Στροβιλοανεμιστήρας (Turbofan)

Ο στροβιλοανεμιστήρας αποτελεί τον απόγονο του στροβιλοαντιδραστήρα, καθιστώντας τον έναν αρκετά πιο εξελιγμένο τύπο κινητήρα, ο οποίος συνδυάζει τα χαρακτηριστικά του προγόνου του και ενός ελικοστρόβιλου. Η ποσότητα μάζας αέρα που επιταχύνεται είναι μικρότερη από αυτή ενός ελικοστρόβιλου αλλά μεγαλύτερη από ενός στροβιλοαντιδραστήρα. Δεν περιορίζεται από το υψόμετρο πτήσης και βρίσκει εφαρμογή σε πλειάδα αεροσκαφών, τόσο πολιτικού νηολογίου, όσο και στρατιωτικού.

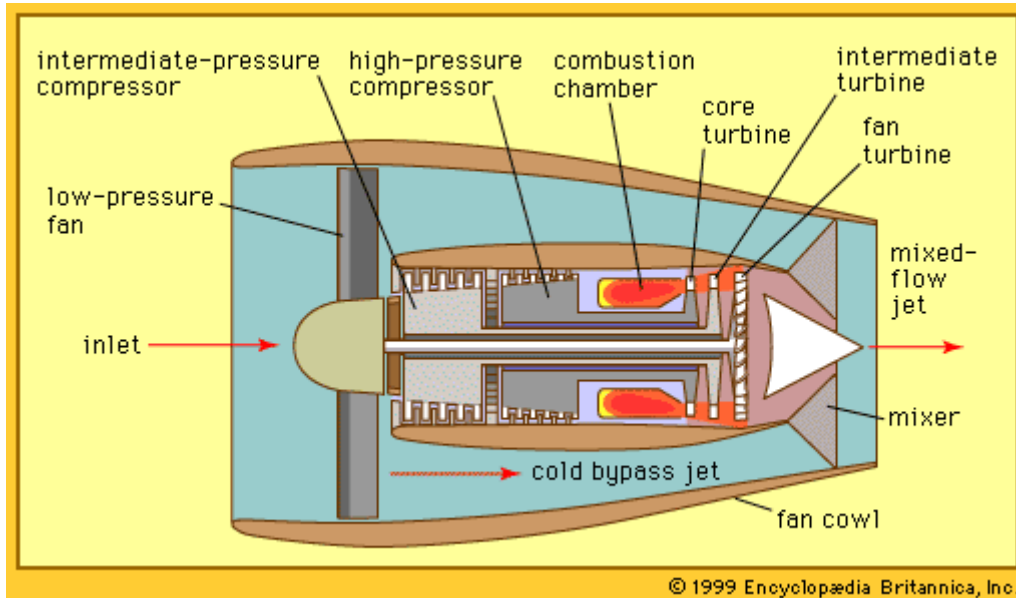
Ο fan, είναι ενσωματωμένος στο εσωτερικό και εμπρόσθιο τμήμα του κινητήρα, γεγονός που δικαιολογεί και την ονομασία fan που έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τον συγκεκριμένο τύπο.

Η ροή του αέρα καθώς εισέρχεται στον κινητήρα ακολουθεί δύο μονοπάτια, ένα ρεύμα διαρρέει τον πυρήνα, το οποίο αποκαλείται και θερμό ρεύμα και ένα δεύτερο, διατρέχει περιφερειακά το σώμα του κινητήρα που χαρακτηρίζεται σαν ψυχρό. Ο λόγος του ψυχρού ρεύματος προς το θερμό ονομάζεται λόγος παράκαμψης (bypass ratio) και αποτελεί μια χαρακτηριστική παράμετρο του στροβιλοανεμιστήρα. Το ψυχρό ρεύμα συμβάλει σε ποσοστό έως και 80% (Καρέλας Ευάγγελος, 2024) στην παραγωγή ώσης, όπου επιταχύνεται από το fan, χωρίς να συμμετάσχει στη διεργασία καύσης. Ανάλογα με την τιμή του λόγου παράκαμψης, γίνεται διαχωρισμός του στροβιλοανεμιστήρα σε χαμηλού ή σε υψηλού λόγου παράκαμψης.

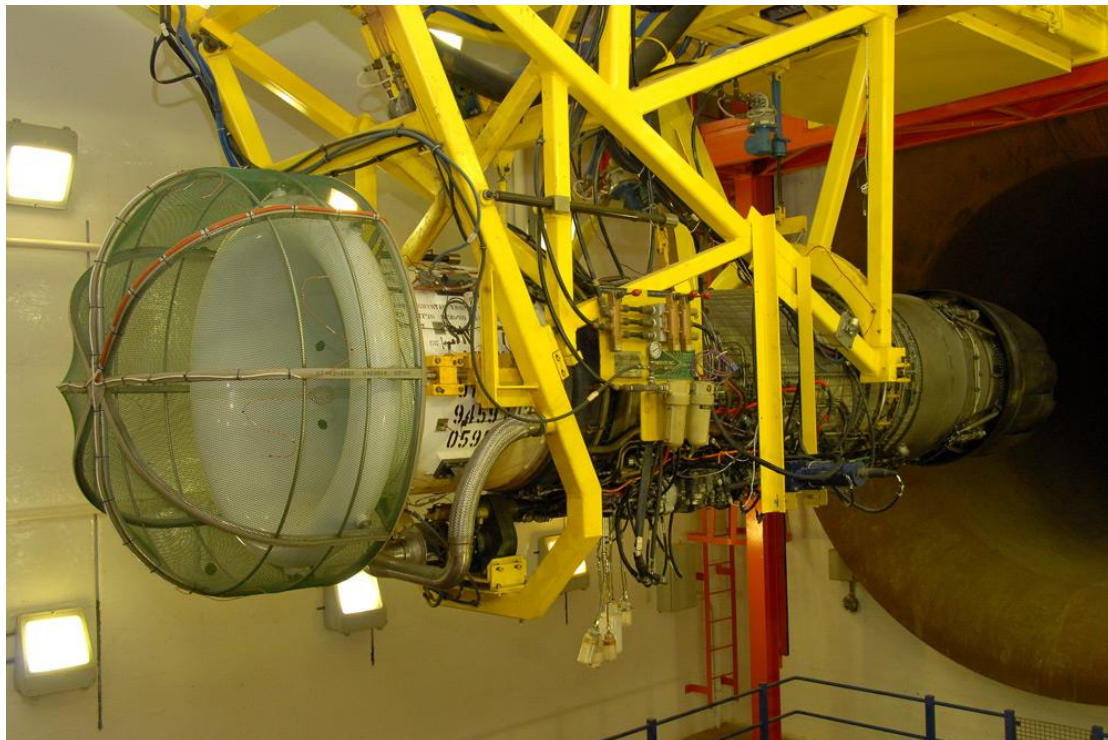
Σε μαχητικά αεροσκάφη απαντώνται κινητήρες χαμηλού λόγου παράκαμψης. Η ποσότητα αέρα που διέρχεται μέσα από το εσωτερικό της μηχανής είναι μικρή σε σύγκριση με αυτή που ρέει εξωτερικά του πυρήνα, με αποτέλεσμα η διάμετρος του fan να προσαρμόζεται σε μικρότερες τιμές. Αντίθετα, turbofan μεγάλου λόγου παράκαμψης, βρίσκουν εφαρμογή σε πολιτικά αεροσκάφη καθότι όπως αναφέρθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό ώσης οφείλεται στο ψυχρό ρεύμα, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση κατανάλωσης καυσίμου.

Το μαχητικό αεροσκάφος F-16C/D Block 52+ Fighting Falcon της ΠΑ φέρει τον General Electric F110-GE-129/100, πλέον αντιπροσωπευτικός για κινητήρες turbofan χαμηλού λόγου παράκαμψης, το αεροσκάφος της πολεμικής αεροπορίας της

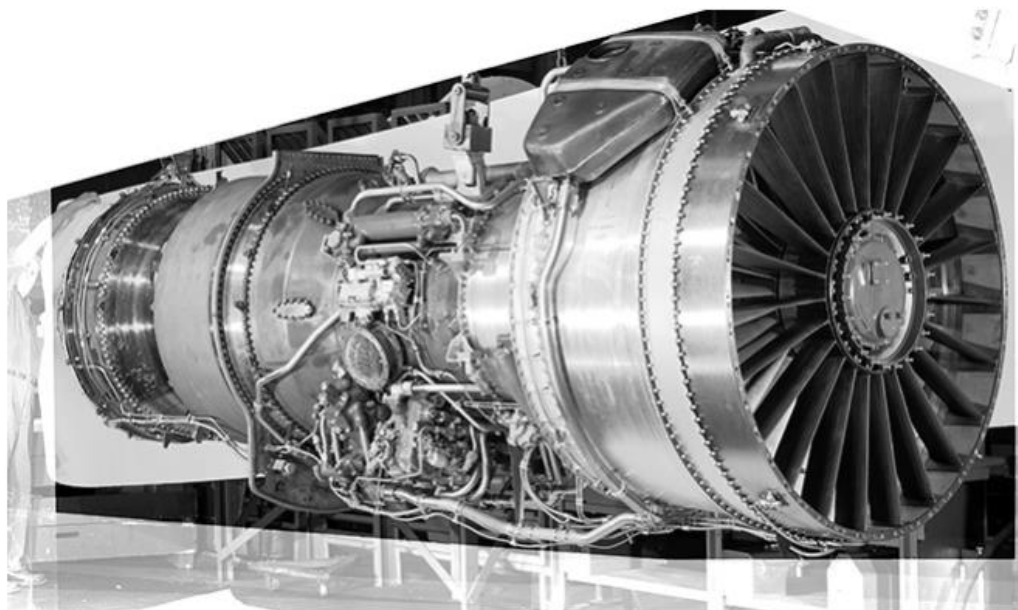
Ρωσίας Sukhoi Su-57 είναι εξοπλισμένο με έναν εξίσου εντυπωσιακής τεχνολογικής προόδου κινητήρα, τον AL-41F1. Τέλος, το αεροσκάφος E-3 AWACS είναι εξοπλισμένο με έναν στροβιλοανεμιστήρα υψηλού λόγου παράκαμψης, τον TF33 από την εταιρεία Pratt & Whitney.



Σχήμα 1.9. Σχηματική αναπαράσταση στροβιλοανεμιστήρα (Alexander D. Baxter, Fredric F.Ehrich - Britannica, 2024)



Σχήμα 1.10. Κινητήρας F110-GE-129 τοποθετημένος εντός δοκιμαστηρίου. Διακρίνεται η κλίνη δοκιμής του ή αλλιώς adapter sling. (ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε.)



*Σχήμα 1.11. Κινητήρας TF33 Pratt & Whitney
(Pratt & Whitney)*

1.4. Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Αναπόσπαστο και αναγκαίο βήμα κατά τη διεξαγωγή του performance ενός κινητήρα, είναι η λεγόμενη διόρθωση των εξαχθέντων από τη δοκιμή, αποτελεσμάτων, σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει ορίσει ο εκάστοτε κατασκευαστής. Συχνά αναφέρεται ο όρος αναγωγή των αποτελεσμάτων, ο οποίος αντιπροσωπεύει τη διαδικασία προσαρμογής των μετρηθέντων τιμών σε συγκεκριμένες προκαθορισμένες συνθήκες αναφοράς.

Μια κοινώς χρησιμοποιούμενη σύμβαση, είναι οι συνθήκες του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organization - IACO), οι οποίες αναφέρονται σε συνθήκες τυπικής μέρας (ISO 2533:1975), εννοώντας θερμοκρασία 15°C, ατμοσφαιρική πίεση 101,325 Pa και σχετική υγρασία 0% (NACA Technical Note 3182, 1954). Φυσικά υπάρχουν και άλλοι τρόποι διόρθωσης των αποτελεσμάτων πέραν του μοντέλου τυπικής μέρας, οι οποίοι εφαρμόζονται βάσει των οδηγιών της τεχνικής βιβλιογραφίας που συνοδεύει τον κάθε κινητήρα.

Κάθε δοκιμή κινητήρα, διενεργείται σε διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι οποίες μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου και κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Οι αρχικές τιμές θερμοκρασίας, πίεσης και σχετικής υγρασίας που λαμβάνονται, είναι αρκετά πιθανό έως βέβαιο, πως δεν θα παραμείνουν σταθερές μέχρι το πέρας της διαδικασίας. Η μεταβολή των συνθηκών αυτών, έστω και μικρή, έχει τεράστια επίδραση στις αποδόσεις του κινητήρα και ως εκ τούτου η μη διόρθωσή τους καθιστά τα αποτελέσματα μη συγκρίσιμα.

Επιπλέον, με την αναφορά των αποτελεσμάτων των δοκιμών σε συγκεκριμένες συνθήκες, διασφαλίζεται αφενός η συμμόρφωση των κινητήρων στις απαιτούμενες προδιαγραφές, αφετέρου ότι η επίδοσή τους ταυτίζεται με τα αναμενόμενα πρότυπα. Ένα μικρό παράδειγμα που περιγράφει την ευαισθησία των μηχανών στις ατμοσφαιρικές συνθήκες θα μπορούσε να είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα, η οποία έχει άμεσο αντίκτυπο και στην πυκνότητά του. Μια μεταβολή των συνθηκών του εργαζόμενου μέσου του κινητήρα, αντικατοπτρίζεται ξεκάθαρα στις τελικές του επιδόσεις. Εξαλείφοντας αυτήν την απόλυτη εξάρτηση, διασφαλίζεται ότι τα δεδομένα είναι αξιόπιστα και συγκρίσιμα, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι οι κινητήρες θα αποδώσουν τα αναμενόμενα σε οποιοσδήποτε περιβαλλοντικές συνθήκες, ικανοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τις προσδοκίες των πελατών.

Για την αναγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται μαθητικές εξισώσεις οι οποίες ενσωματώνουν και συσχετίζουν μεταξύ τους τις ληφθέντες μετρήσεις με τρόπο κατάλληλο ώστε να λαμβάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η παρούσα εργασία, πραγματεύεται ακριβώς ό,τι συζητήθηκε ανωτέρω, την διόρθωση δηλαδή των τελικών μετρήσεων με την αναγωγή τους σε συνθήκες τυπικής μέρας, αναβαθμίζοντας όμως τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η εν λόγω διαδικασία, κατασκευάζοντας μια εφαρμογή με την βοήθεια του MATLAB, ενός υψηλού επιπέδου περιβάλλοντος προγραμματισμού και υπολογιστικής ανάλυσης.

Με την χρήση μιας τέτοιας εξελιγμένης εφαρμογής παρέχεται η δυνατότητα περαιτέρω αξιοποίησης των δεδομένων, συγκριτικά με την προηγούμενη χειροκίνητη μέθοδο, και είναι πιο φιλική προς τον χρήστη καθώς με τις πολλαπλές δικλίδες ασφαλείας στο στάδιο εισαγωγής των δεδομένων, μειώνει την περίπτωση σφάλματος κατά την πληκτρολόγησή τους.

Προσφέρεται η συλλογή μετρήσεων σε πλήθος σημείων στο στάδιο του performance, όπου συνήθως ο αριθμός των σημείων ενδιαφέροντος για την συγκέντρωση πολύτιμων δεδομένων για τον προσδιορισμό της υγείας του κινητήρα ανέρχεται σε μονοψήφιο αριθμό λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων της αρχικής μεθόδου, επομένως μεγαλύτερος όγκος πληροφοριών συνεπάγεται και μια πιο εμπειρισταωμένη και ακριβή απεικόνιση της κατάστασης του κινητήρα, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την ανίχνευση οποιασδήποτε δυσλειτουργίας.

Τέλος, με την ανάπτυξη του κώδικα, διενεργήθηκαν κάποιες αρκετά σημαντικές παραμετρικές αναλύσεις με σκοπό την καταγραφή της επίδρασης των μετρούμενων μεγεθών στη φάση της δοκιμής στη τελική επίδοση του κινητήρα, ανιχνεύοντας ταυτόχρονα των σημαντικότερων εξ αυτών μετρούμενων μεγεθών.

1.5. Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Ακολουθεί μια συνοπτική ανάλυση του περιεχομένου της εργασίας:

Στο Κεφάλαιο 2, τονίζεται η κρισιμότητα των μεγεθών των επιδόσεων στην απρόσκοπτη λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου. Γίνεται αναφορά των μεγεθών σε ονομαστικές και ελάχιστες επιδόσεις. Αποτυπώνεται η ανάγκη διόρθωση των εξαχθέντων μετρήσεων και η αναγωγή τους σε συνθήκες τυπικής μέρας, με σκοπό την αξιόπιστη σύγκριση των αποτελεσμάτων της δοκιμής, απελευθερωμένων από την επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Απαριθμούνται τα μεγέθη ενδιαφέροντος στη φάση του performance, τα οποία διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στις μετέπειτα διορθωτικές εξισώσεις.

Στο Κεφάλαιο 3, επιλέγεται ως παράδειγμα για περαιτέρω ανάλυση, ο ελικοστρόβιλος A/K Allison T56 κατασκευαστής του οποίου είναι η εταιρεία Rolls Royce. Θα γίνει περιγραφή των τμημάτων του A/K, θα αναφερθούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του και θα παρατεθούν παραδείγματα αεροσκαφών που φέρουν αυτόν τον τύπο κινητήρα. Θα αναλυθεί η διαδικασία ελέγχου των επιδόσεων και θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας της δοκιμής, όπως αυτή λαμβάνει χώρα στην Υπηρεσία Δοκιμαστηρίων της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας.

Στο Κεφάλαιο 4, θα παρουσιαστεί η διαδικασία υπολογισμού των επιδόσεων, και θα παρουσιαστούν και επεξηγηθούν τα οφέλη χρήσης του αναπτυχθέντος λογισμικού. Θα επισημανθούν τα μετρούμενα μεγέθη καθώς και οι απαραίτητες διορθώσεις αυτών βάσει των διορθωτικών εξισώσεων που επιβάλλονται από τις τεχνικές οδηγίες του κινητήρα. Θα γίνει πλήρης ανάπτυξη και επεξήγηση του λογισμικού που αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του MATLAB, ενώ απαραίτητα θα ακολουθήσει και η πιστοποίησή του με τα ήδη υπάρχοντα εργαλεία που επωμίζονται την ευθύνη της διόρθωσης των τιμών.

Στο Κεφάλαιο 5, θα αναλυθεί η επίδραση των μετρούμενων μεγεθών στον υπολογισμό των επιδόσεων. Θα διεξαχθεί παραμετρική ανάλυση των ληφθέντων δεδομένων, θα ακολουθήσει ο προσδιορισμός των σημαντικότερων παραμέτρων και πώς αυτά επηρεάζουν τις επιδόσεις του κινητήρα.

Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται μια σύνοψη της εν λόγω εργασίας, παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα και γίνεται λόγος για μελλοντικές προτάσεις.

Κεφάλαιο 2: Μεγέθη Επιδόσεων και Διόρθωση Μετρήσεων

2.1. Μεγέθη Επιδόσεων

Ο όρος μεγέθη επιδόσεων, αναφέρεται σε σημαντικές παραμέτρους που χρησιμεύουν για την αξιολόγηση της απόδοσης και συνολικά της υγείας του κινητήρα. Η καταγραφή αυτών των μεγεθών είναι υψίστης σημασίας καθώς παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα η οποία συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αεριοστρόβιλου, ενώ παράλληλα τα δεδομένα αυτά συνεισφέρουν στον διαγνωστικό έλεγχο, διευκολύνοντας την αναγνώριση πιθανών προβλημάτων και στην υιοθέτηση προληπτικών μέτρων για την εξασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας της μηχανής.

2.1.1. Ονομαστική Ισχύς – Πραγματική Ισχύς

Κυριότερο εξ αυτών, αποτελεί η ονομαστική ισχύς του αεριοστρόβιλου, δηλαδή ή μέγιστη ισχύς σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή που μπορεί να παραχθεί υπό κανονικές και ιδανικές συνθήκες λειτουργίας. Εκφράζεται είτε σε μονάδες ώσης με μονάδα μέτρησης τα lbf, αν πρόκειται για στροβιλοανεμιστήρα (turbofan) ή στροβιλοαντιδραστήρα (turbojet), είτε σε ίππους (hp) στην περίπτωση ενός ελικοστρόβιλου υποδεικνύοντας την ισχύ που μπορεί να παραχθεί για να κινήσει την προπέλα, είτε σε ιπποδύναμη άξονα (shaft horse power - shp), που μεταφράζεται ως η ισχύς που παραδίδεται στον άξονα του κινητήρα. Θα μπορούσε να πει κανείς πως είναι η μέγιστη ασφαλής ισχύς που μπορεί να επιτευχθεί για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, δίχως να είναι ζημιογόνα για τα επιμέρους τμήματα της μηχανής. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ο αεριοστρόβιλος δεν θα λειτουργεί συνεχώς στα επίπεδα που ορίζονται από την ονομαστική ισχύ. Είναι ένα μέγεθος το οποίο εξυπηρετεί στην ορθότερη αξιολόγηση και επιλογή του κατάλληλου τύπου κινητήρα, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε αεροσκάφους.

Πέραν της ονομαστικής ισχύος η οποία προβλέπεται από τους κατασκευαστές και άρα πρόκειται για μια κατασκευαστική προδιαγραφή η οποία δεν επιδέχεται μεταβολής και αφορά ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, ένα ακόμα κρίσιμο μέγεθος είναι η παρατηρούμενη ισχύς (observed value). Περιγράφει την πραγματική ισχύ που επιτυγχάνεται από τον αεριοστρόβιλο υπό πραγματικές συνθήκες πτήσης. Είναι αναμενόμενο έως σύνηθες, οι δύο τιμές της ονομαστικής και πραγματικής ισχύς να διαφέρουν μεταξύ τους. Διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία του αέρα, η γενική κατάσταση του κινητήρα, όπου με την πάροδο του χρόνου είναι αναμενόμενη η οποιαδήποτε φθορά, η ποιότητα του χρησιμοποιούμενου καυσίμου ή η διεργασία της ίδιας της καύσης είναι μερικοί μόνο από τους λόγους που δικαιολογούν τη διαφοροποίηση των δύο μεγεθών. Ιδιαίτερη μνεία θα δοθεί στις προαναφερθείσες συνθήκες περιβάλλοντος και στην καθοριστική τους επιρροή στις αποδόσεις του κινητήρα, καθότι αποτελεί τον θεμελιώδη άξονα της εργασίας.

2.1.2. Ροπή (Torque)

Το μέγεθος της ροπής (in lbs) είναι αναπόσπαστο στοιχείο μέτρησης στις περιπτώσεις ελικοστρόβιλων (turbo-prop) και αξονοστρόβιλων (turbo-shaft). Κινητήρες τέτοιων τύπων, χρησιμοποιούν έναν άξονα για τη μετάδοση της παραγόμενης από τον στρόβιλο μηχανικής ενέργειας στον έλικα ή στον άξονα του στροφείου στην περίπτωση ενός ελικοπτερου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ενέργεια των καυσαερίων ενός ελικοστρόβιλου κινητήρα, αποδίδεται σε ποσοστό έως και 90% ως ισχύς (kW) στον άξονα που κινεί τον έλικα, με το υπόλοιπο 10% (Καρέλας Ευάγγελος, 2024) της ενέργειας να παρέχεται υπό μορφή ώσης (lbf). Σε κινητήρες turbofan και turbojet όπου η αρχή λειτουργίας τους δεν βασίζεται στη μεταφορά μηχανικής ροπής μέσω άξονα, αλλά στην παραγόμενη ώση εξαιτίας τόσο των καυσαερίων όσο και του ρεύματος αέρα που παρακάμπτει τον πυρήνα του κινητήρα, αν γίνεται αναφορά σε στροβιλοανεμιστήρες (turbofan), ή εξ ολοκλήρου του ρεύματος των καυσαερίων για την κατηγορία των στροβιλοαντιδραστήρων (turbojet), η ύπαρξη οποιαδήποτε ποσότητας ροπής κρίνεται αμελητέα.

2.1.3. Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου (Specific Fuel Consumption-s.f.c.)

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου (specific fuel consumption-s.f.c.) ενός αεριοστρόβιλου σε συνδυασμό πάντα με τις εκάστοτε ισχύουσες συνθήκες περιβάλλοντος, είναι ένας κρίσιμος δείκτης ως προς την αποδοτικότητα του κινητήρα. Ουσιαστικά, αποτελεί ένα μέγεθος που μετρά την ποσότητα του καταναλωμένου καυσίμου για την παραγωγή είτε ώσης είτε μηχανικής ισχύος. Είναι εμφανές πως η προσπάθεια επίτευξης όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ισχύος με τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση, ιδιαίτερα τη σύγχρονη εποχή όπου οι τιμές των καυσίμων αυξάνονται με εντυπωσιακό ρυθμό, είναι υψίστης σημασίας στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του κινητήρα και φυσικά στη μείωση των εκπομπών ρύπων.

Ποικίλοι παράγοντες επιδρούν στη συμπεριφορά και του s.f.c. και της τελικής απόδοσης. Οποιαδήποτε μεταβολή του ρυθμού ροής μάζας (mass flow rate) του αέρα διαμέσου του κινητήρα έχει άμεσο αντίκτυπο στις επιδόσεις του. Ο λόγος πίεσης, αντικατοπτρίζοντας τον λόγο της πίεσης εισόδου του αέρα στον συμπιεστή προς την τιμή της πίεσης που έχει αποκτήσει κατά την έξοδό του από αυτόν, η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον στρόβιλο ή αλλιώς γνωστή ως ΤΙΤ, οι επιμέρους βαθμοί απόδοσης των επιμέρους εξαρτημάτων του κινητήρα θα ασκήσουν σημαντικότερη επιρροή.

Οι απαιτήσεις από έναν τέτοιο κινητήρα δεν υπεισέρχονται μονάχα στην επίτευξη της απαιτούμενης ώσης ή ροπής. Θα πρέπει να ανταποκρίνεται θετικά και σε ό,τι αφορά τις ποσότητες καυσίμου που καταναλώνει, με αποτέλεσμα αν η παραγόμενη ώση ή μηχανική ισχύς του κυμαίνεται σε ικανοποιητικά όρια, ενώ οι καταναλωτικές του αποδόσεις είναι εκτός του επιθυμητού, σίγουρα δεν γίνεται λόγος για μια αποδοτική μηχανή. Ζητούμενο δεν είναι μόνο η ανύψωση του αεροσκάφους, αλλά πρωτίστως η βέλτιστη διαχείριση του καυσίμου σε όλη τη διάρκεια της πτήσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις των turbofan και turbojet η ειδική κατανάλωση καυσίμου συναντάται ως specific TSFC (Thrust Specific Fuel Consumption) η οποία μεταφράζεται ως η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται από τον κινητήρα σε μια ώρα προς την ώση που παράγεται. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μονάδες μέτρησης. Στο Αγγλοσαξονικό Σύστημα χρησιμοποιούνται οι λίβρες μάζας ανά ώρα ανά λίβρα δύναμης, ενώ στο Μετρικό τα κιλά ανά ώρα ανά Newton. Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει το TSFC (NASA, 2024), δίνεται ακολούθως:

$$TSFC = \frac{\dot{m}_f}{F}$$

\dot{m}_f : ροή μάζας καυσίμου

F : παραχθείσα δύναμη ώσης

Ο παραπάνω τύπος θα μπορούσε να τροποποιηθεί αν αριθμητής και παρονομαστής διαιρεθούν με τη ροή μάζας του αέρα. Με αυτόν τον τρόπο εισάγεται μια νέα σημαντική παράμετρος που αντιπροσωπεύει έναν εξίσου σημαντικό λόγο, τον λόγο καυσίμου-αέρα.

$$TSFC = \frac{f}{F_s}$$

f : λόγος καυσίμου-αέρα (fuel to air ratio)

F_s : ειδική ώση

Τέλος, για αξονοστρόβιλους κινητήρες κατ' αντιστοιχία, η ειδική κατανάλωση καυσίμου συναντάται ως BSFC (Brake Specific Fuel Consumption). Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι μονάδες μέτρησης θα είναι οι λίβρες καυσίμου ανά ίππο ανά ώρα.

Ωστόσο, για όλες τις περιπτώσεις ανεξάρτητα από τον τύπο του αεριοστρόβιλου, οι προσπάθειες των μηχανικών στοχεύουν στην μέγιστη δυνατή μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

2.1.4. Ροή Καυσίμου (Fuel Flow)

Επόμενο σημαντικό μέγεθος είναι η ροή του καυσίμου (fuel flow). Αναφέρεται στην ποσότητα του καυσίμου που εισέρχεται στον κινητήρα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Μονάδες μέτρησης είναι οι lb/hr , δηλαδή πόσες λίβρες καυσίμου καταναλώνονται κάθε ώρα λειτουργίας. Αν και η καταναλισκόμενη ποσότητα τείνει να διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες της πτήσης ακόμα και για ίδιου τύπου κινητήρες, η ροή καυσίμου παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία του κινητήρα καθώς καθορίζει το ποσό του καυσίμου που τροφοδοτεί τον κινητήρα για την απαιτούμενη παραγωγή ενέργειας.

2.1.5. Θερμοκρασίες και Πιέσεις Ψυχρού και Θερμού Τιμήματος

Ανεξάρτητα από τον τύπο του κινητήρα, turbofan, turbojet, turboprop ή turboshaft και τις απαιτήσεις του εκάστοτε performance, γίνεται συλλογή πληθώρας ενδείξεων θερμοκρασιών και πιέσεων σε όλες τις συνιστώσες του κινητήρα. Ενδείξεις πιέσεων στην είσοδο του συμπιεστή και στην έξοδό του, αντίστοιχα στην είσοδο και έξοδο του στροβίλου αλλά και ενδείξεις θερμοκρασιών, αποσκοπούν στην παρακολούθηση της κατάστασης της μηχανής σε όλες τις συνιστώσες της και στοχεύουν στην έκδοση πορίσματος για την γενικότερη υγεία του κινητήρα.

Ειδικότερα, η μέτρηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του αέρα κατά την έξοδό του από τον συμπιεστή, είναι ένδειξη της αποτελεσματικότητας της συμπίεσης και επιπλέον εξυπηρετεί στον υπολογισμό του λόγου συμπίεσης. Η σωστή λειτουργία του συμπιεστή επηρεάζει τις μετέπειτα φάσεις, ξεκινώντας με την διεργασία της καύσης και μακροπρόθεσμα την ισχύ του κινητήρα.

Στην περιοχή του θαλάμου καύσης είναι ζωτικής σημασίας η επίτευξη όλων των κρίσιμων παραμέτρων εντός των αποδεκτών ορίων. Είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται το μήκος της φλόγας στην πρωτεύουσα ζώνη (primary zone) και να δημιουργεί τάχιστα το σωστό μίγμα καυσίμου-αέρα μέσω του swirler (στροβιλιστή). Κατά την σχεδίασή του έχει προβλεφθεί η επιτάχυνση του αυξημένου όγκου των καυσαερίων προς την 1^η σταθερή βαθμίδα του στροβίλου με τις λιγότερες απώλειες ολικής πίεσης και με τη μέγιστη απόδοση για όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Είναι δεδομένο, πως οποιαδήποτε μεταβολή της θερμοκρασίας, της πίεσης ή της εισερχόμενης μάζας αέρα πέραν των προβλεπόμενων, μπορεί να οδηγήσει σε πρόκληση βλαβών στα υλικά του κινητήρα, για παράδειγμα, αν οι επικρατούσες θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές ή σε μη πλήρη καύση αν είναι πολύ χαμηλές. Ακόμα ένα φτωχό μίγμα καυσίμου-αέρα είναι προάγγελος ανάπτυξης θερμοκρασιών πολύ μεγαλύτερων των επιθυμητών, προκαλώντας ασταθή καύση, καθότι μπορεί να καεί αργά ή ακανόνιστα. Αντίθετα υπερβολικό πλούσιο μίγμα καυσίμου-αέρα δημιουργεί υψηλότερες πιέσεις στα καυσάερια. Το καύσιμο ενδέχεται να μην καεί εξ ολοκλήρου εσωτερικά του θαλάμου και να συνεχίσει να καίγεται μέχρι και την έξοδό του από αυτόν.

Στην έξοδο του στροβίλου είναι αναμενόμενη η επικράτηση υψηλών θερμοκρασιών, όμως τιμές εκτός των επιτρεπόμενων ορίων, καταπονούν τα εξαρτήματα.

Η συνεχής παρακολούθηση όλων αυτών των ενδείξεων, παρέχει συνεχή πληροφόρηση που αποσκοπεί επίσης στην προστασία του κινητήρα από υπερθέρμανση ή από την ανάπτυξη υψηλών πιέσεων. Υπερβολικές θερμοκρασίες πιθανότατα θα οδηγήσουν σε θερμική καταπόνηση των υλικών του κινητήρα και μετέπειτα σε αστοχία τους, ενώ αύξηση της πίεσης μπορεί να οδηγήσει σε μηχανική καταπόνηση. Όλο το πλήθος των μετρούμενων αυτών ενδείξεων βοηθά στον έγκαιρο εντοπισμό προβλημάτων και δυσλειτουργιών προτού αποβούν ολέθριες.

2.1.6. Μετρήσεις Κραδασμών (Vibrations Survey)

Η ανάπτυξη κραδασμών είναι φυσικό συνεπακόλουθο της λειτουργίας των κινητήρων. Υπερβολικοί ή ασυνήθιστοι κραδασμοί ενδέχεται να υποδηλώνουν προβλήματα που οφείλονται σε μηχανικές φθορές, φθαρμένα εξαρτήματα, αστοχία ζυγοστάθμισης. Η σωστή ζυγοστάθμιση, ώστε το κέντρο μάζας των περιστρεφόμενων μερών να ευθυγραμμίζεται με τον άξονα περιστροφής, είναι καίριας σημασίας για την αποφυγή ανεπιθύμητων κραδασμών. Επιδιορθώνοντας τη μη σωστή κατανομή μάζας, εξασφαλίζεται η αποφυγή ανάπτυξης επιβλαβών δυνάμεων στον άξονα ή σε άλλα κινούμενα μέρη κατά την περιστροφή τους. Η σημασία της παρακολούθησης των κραδασμών συμβάλει στην πρόληψη βλαβών, στη διάγνωση μηχανικών προβλημάτων, στην αξιολόγηση της ευθυγράμμισης και εντέλει στην αξιοπιστία και αποδοτικότητα των μηχανών, με μακροπρόθεσμα οφέλη στην διάρκεια ζωής τους και στη μείωση του κόστους και χρόνου επισκευών.

Επιπρόσθετα, η παρουσία κραδασμών ενδέχεται να οφείλεται και σε φθορά των ρουλεμάν. Αν κατά την εκκίνηση του A/K αναπτυχθούν ανεπιθύμητοι κραδασμοί, με δεδομένο τον έλεγχο όλων των επιμέρους εξαρτημάτων του, τότε η ύπαρξή τους αποδίδεται σε προβλήματα αζυγοσταθμίας. Ωστόσο αν παρατηρηθούν κραδασμοί κατά την πτήση του αεροσκάφους και χωρίς να έχει προηγηθεί κάποιο FOD, η ύπαρξή τους οφείλεται σε αστοχία των ρουλεμάν. Άλλωστε, οι μετρήσεις κραδασμών γίνονται με αισθητήρες οι οποίοι τοποθετούνται στις εδράσεις.

2.2. Ονομαστικές και Ελάχιστες Επιδόσεις

Οι ονομαστικές και οι ελάχιστες επιδόσεις χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και την αξιολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων αλλά και του συνόλου του κινητήρα. Οι ονομαστικές επιδόσεις αφορούν τις προβλεπόμενες επιδόσεις του συστήματος όπως αυτές καθορίζονται από τον κατασκευαστή. Ως ονομαστική απόδοση αναφέρεται η τιμή η οποία αναμένεται να επιτευχθεί υπό ιδανικές συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και γενικότερων βέλτιστων περιβαλλοντικών συνθηκών. Η ονομαστική ισχύς ή ονομαστική όση, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, αφορά τη μέγιστη ισχύ που είναι σε θέση να παραδώσει ο κινητήρας λειτουργώντας υπό βέλτιστες συνθήκες. Ονομαστική κατανάλωση καυσίμου, με παρόμοιο τρόπο ορίζεται ως η μέγιστη κατανάλωση καυσίμου που αναμένεται κατά την κανονική του λειτουργία. Ο όρος επεκτείνεται στο μέγεθος της ροπής, της ροής καυσίμου, όλων των μεγεθών θερμοκρασίας και πίεσης, όπως και στις ενδείξεις κραδασμών. Όλες οι ονομαστικές τιμές λειτουργούν ως σημείο αναφοράς και αποτελούν μέτρο σύγκρισης για την αξιολόγηση του συστήματος.

Στον αντίποδα των ονομαστικών, βρίσκονται οι ελάχιστες επιδόσεις που αντιπροσωπεύουν τα κατώτερα αποδεκτά όρια που ο κινητήρας επιτρέπεται να λειτουργήσει αποτελεσματικά και με ασφάλεια. Για παράδειγμα η ελάχιστη ισχύς αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ισχύ που ο κινητήρας επιτρέπεται να δώσει, δίχως να εμφανιστούν προβλήματα αστάθειας στη λειτουργία του. Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο

ορίζονται όλες οι σημαντικές για την αξιολόγηση, παράμετροι. Θα πρέπει να τονιστεί, πως δεν υφίστανται η έννοια της ελάχιστης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου καθότι σκοπός είναι η επίτευξη ελάχιστης κατανάλωσης.

Η σχέση μεταξύ ονομαστικών και ελάχιστων επιδόσεων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη. Οι ονομαστικές και οι ελάχιστες επιδόσεις είναι άρρηκτα συνδεδεμένες. Ενώ οι ονομαστικές τιμές καθορίζουν τα μέγιστα όρια περιγράφοντας την ιδανική λειτουργία, οι ελάχιστες αφορούν τα ελάσσονα όρια. Η σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών επιδόσεων προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες. Η απόκλιση από τις ονομαστικές επιδόσεις, είναι αναμενόμενη καθώς ο αεριοστρόβιλος δεν δύναται να λειτουργεί συνέχεια υπό αυτές τις συνθήκες μιας και οι συνθήκες περιβάλλοντος διαδραματίζουν ίσως τον πιο σημαντικό ρόλο στην απόδοσή του. Η φθορά που έχει υποστεί η μηχανή, ο χρόνος ζωής των εξαρτημάτων είναι παράγοντες που και αυτοί δικαιολογούν την διαφοροποίηση των πραγματικών ενδείξεων. Πτώση όμως, κάτω των ελάχιστων επιδόσεων, είναι απαγορευτική και ο κινητήρας δεν λειτουργεί με ασφάλεια, αποδοτικότητα και γίνεται επιτακτική η ανάγκη επισκευής του.

Όλα τα επιτρεπτά όρια μπορούν να προσδιοριστούν, είτε μέσω διαγραμμάτων, είτε περιγράφονται στις τεχνικές οδηγίες κάθε κινητήρα οι οποίες παρέχονται από τον κατασκευαστή.

2.3. Επίδραση των Ατμοσφαιρικών Συνθηκών στις Επιδόσεις και Απαίτηση Διόρθωσης Αυτών για Σύγκριση

Οι συνθήκες περιβάλλοντος διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στα τελικά αποτελέσματα. Για την ύπαρξη αξιόπιστων και συγκρίσιμων μετρήσεων, η διόρθωση των εξαχθέντων επιδόσεων είναι απαραίτητη. Η λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου οποιουδήποτε τύπου, στηρίζεται στην εισερχόμενη σε αυτόν, ροή μάζας και στο ταξίδι της κατά μήκος όλης της γεωμετρίας του. Σε σταθερή ταχύτητα, ο συμπιεστής εισάγει έναν σταθερού όγκου αέρα στο εσωτερικό της μηχανής. Εάν η πυκνότητα του αέρα μειωθεί, με δεδομένο ότι ο όγκος διατηρείται σταθερός, παρέχεται λιγότερη μάζα αέρα που συνεπακόλουθα σημαίνει την παραγωγή λιγότερης ισχύς. Εάν αυξηθεί, εξακολουθώντας ο όγκος να διατηρείται σταθερός, θα αυξηθεί και η απόδοση. Γίνεται αντιληπτό πως η αυξομείωση της πυκνότητας του αέρα εξαιτίας των διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών, επιδρά στην παραγωγή της απαιτούμενης ώσης ή ροπής. Σε μια κρύα μέρα, η πυκνότητα θα είναι αυξημένη με αποτέλεσμα την εισαγωγή περισσότερης ποσότητας μάζας στον συμπιεστή και άρα θα παρατηρηθεί αύξηση της απόδοσης. Αντιθέτως σε μια ζεστή μέρα ή σε ένα υψηλό υψόμετρο όπου η πυκνότητα του αέρα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, λιγότερη μάζα θα διαπεράσει το σώμα του αεριοστρόβιλου και ενδέχεται η απόδοσή του να μην είναι ικανοποιητική. Από όλα τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η εξάρτηση θερμοκρασίας-πυκνότητας είναι υψίστης σημασίας για τους επιθυμητούς αποδιδόμενους ίππους ή την επιθυμητή ώση σε κάθε περίπτωση.

Πέραν του συνδυασμού θερμοκρασίας-πυκνότητας, ακόμα ένα μέγεθος ιδιάζουσας σημασίας είναι η βαρομετρική πίεση καθώς συνδέεται άμεσα με την

πυκνότητα του αέρα. Η βαρομετρική πίεση, γνωστή και ως ατμοσφαιρική είναι η πίεση που ασκείται από την ατμόσφαιρα της Γης. Είναι το αποτέλεσμα που ασκεί το βάρος του αέρα πάνω σε οποιαδήποτε επιφάνεια. Αναμενόμενα, η τιμή αυτής της πίεσης δεν μένει ποτέ η ίδια, αλλά μεταβάλλεται εξαιτίας των καιρικών συνθηκών και του υψόμετρου. Υψηλή βαρομετρική πίεση παρουσιάζεται σε χαμηλό υψόμετρο γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη πυκνότητα αέρα και άρα πυκνότερος αέρας θα εισάγεται στον συμπιεστή σε κάθε κύκλο συμπίεσης. Χαμηλή βαρομετρική, συναντάται σε μεγάλο υψόμετρο καταδεικνύοντας χαμηλότερα επίπεδα πυκνότητας, με αποτέλεσμα η μάζα του αέρα να είναι μικρότερη. Η συνολική απόδοση του κινητήρα όπως είναι φυσικό θα μειωθεί, λόγω του ότι δεν υπάρχει επαρκής ποσότητα εισαχθέντος στην μηχανή, αέρα. Αλλαγές στην βαρομετρική πίεση οφείλονται και στις επικρατούσες καιρικές συνθήκες χάριν εμφανιζόμενων συστημάτων κακοκαιρίας. Υψηλή πίεση σε χαμηλό υψόμετρο επιφέρει μεγαλύτερη απόδοση, ενώ χαμηλή πίεση σε υψηλό υψόμετρο ή σε άσχημες καιρικές συνθήκες μεταφράζεται ως μείωση της απόδοσης.

Η διόρθωση των τιμών είναι αναγκαία για την συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων, την αποφυγή λανθασμένων εκτιμήσεων απόδοσης, τη διατήρηση της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και της αποδοτικότητας του κινητήρα, καθώς και της διασφάλισης της βεβαιότητας λήψης ακριβών μετρήσεων απόδοσης. Ανωτέρω έγινε εκτενής αναφορά στον τρόπο επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών στην ομαλή λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου και στην ενίσχυση ή μη της απόδοσής του. Για να είναι εφικτή μια σύγκριση όλων των μετρήσεων καθίσταται αναγκαία η διόρθωσή τους και η αναγωγή τους σε συνθήκες τυπικής μέρας (NACA Technical Note 3182, 1954), λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη και την επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η διόρθωση εξασφαλίζει ότι τα τελικά αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με τις προδιαγραφές που ορίζει ο κατασκευαστής ή με αποτελέσματα διαφορετικών κινητήρων ίδιου τύπου απαλλαγμένα από την επιρροή των καιρικών συνθηκών λειτουργίας. Μετρήσεις χωρίς να έχουν υποστεί κάποια διόρθωση ενδέχεται να δρουν παραπλανητικά. Σε ένα ψυχρό κλίμα είναι αναμενόμενο ο κινητήρας να εμφανίσει καλύτερη συμπεριφορά από ότι σε ένα θερμό, κάτι που ισχύει εν μέρη. Παρόλα αυτά, χωρίς την διόρθωση, το αποτέλεσμα εξακολουθεί να μην θεωρείται ακριβές.

Επιπροσθέτως, τα διορθωμένα αποτελέσματα εξασφαλίζουν ασφάλεια και αξιοπιστία λόγω του ότι η σύγκριση των ονομαστικών επιδόσεων που υπόσχεται ο κατασκευαστής με τα παρατηρούμενα (observed) δεδομένα υπό πραγματικές συνθήκες που δίνει ο κινητήρας, πραγματοποιείται στο πλαίσιο αυστηρής ανάλυσης και ελέγχου.

2.4. Μετρούμενα Μεγέθη Υπολογισμού Επιδόσεων

Η τελική διαδικασία εξαγωγής των διορθωμένων αποτελεσμάτων περιλαμβάνει σε πρώτο βήμα την συλλογή πληθώρας μετρήσεων από την ίδια την δοκιμή ή αλλιώς τη διαδικασία αξιολόγησης των επιδόσεων του κινητήρα και σε επόμενο στάδιο την επεξεργασία και ανάλυση αυτών. Σκοπός είναι η λήψη όλων των απαραίτητων παραμέτρων, ώστε όλες οι εξαχθείσες τιμές να χρησιμοποιηθούν μετέπειτα στις επιβαλλόμενες διορθωτικές εξισώσεις.

Ξεκινώντας τη διαδικασία του performance, γίνεται λήψη των τιμών της βαρομετρικής πίεσης βάσει των επικρατούντων καιρικών συνθηκών και φυσικά η τιμή της πίεσης που επικρατεί στο περιβάλλον δοκιμής του κινητήρα. Αν ο κινητήρας είναι τοποθετημένος στο Test Cell ενός Δοκιμαστηρίου, απαιτείται καταγραφή της περιβάλλουσας τιμής της πίεσης. Οι μονάδες μέτρησης και των δύο μεγεθών εκφράζονται σε ίντσες υδραργύρου (in Hg).

Οι μονάδες μέτρησης κάθε παραμέτρου είναι καθοριστικής σημασίας. Πρέπει να ακολουθούνται πιστά οι οδηγίες που αναγράφονται στην τεχνική βιβλιογραφία και ορίζονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Η ακρίβεια των μονάδων πρέπει να τηρείται ευλαβικά δεδομένου του ότι διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διόρθωση των τιμών.

Στη συνέχεια γίνεται καταγραφή της θερμοκρασίας στην είσοδο του συμπιεστή, την λεγόμενη CIT (Compressor Inlet Temperature). Σε περίπτωση που η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στο συμπιεστή είναι αυξημένη συνεπάγεται μείωση της πυκνότητας που με την σειρά της οδηγεί σε μείωση της μάζας εισερχόμενου αέρα στον κινητήρα. Είναι γνωστό πως μειωμένη πυκνότητα είναι συνυφασμένη με χαμηλότερες αποδόσεις.

Ακολουθεί η πίεση εξόδου της ροής από τον συμπιεστή, CDP (Compressor Discharge Pressure), κρίσιμος δείκτης για την σωστή λειτουργία του συμπιεστή και της αποτελεσματικής συμπίεσης. Μετριέται σε μονάδες psig.

Στην περίπτωση ελικοστρόβιλου ή αξονοστρόβιλου κινητήρα, αναπόσπαστο σημείο μέτρησης είναι η τιμή της ροπής ενώ αν γίνεται αναφορά σε στροβιλοανεμιστήρα ή στροβιλοαντιδραστήρα, την θέση της ροπής καταλαμβάνει η δύναμη ώσης. Μονάδες μέτρησης της ροπής, όπως ήδη έχει επισημανθεί είναι τα in lbs, ενώ στην περίπτωση ώσης οι χρησιμοποιούμενες μονάδες μέτρησης είναι τα lbf.

Ακολουθούν οι ενδείξεις της θερμοκρασίας λαδιού ($^{\circ}C$) όπου αυστηρά κυμαίνεται σε ένα προκαθορισμένο εύρος τιμών, του OBS FF (*lbs/hr*), δηλαδή της ροής καυσίμου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Οι στροφές του κινητήρα, εκφρασμένες σε rpm, αποτελούν ένδειξη ζωτικής σημασίας και ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν την ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα. Βάσει κατασκευαστή, ο κινητήρας λειτουργεί αποδοτικά σε ένα πολύ συγκεκριμένο εύρος στροφών, το οποίο διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα. Όταν οι στροφές του κινητήρα είναι χαμηλότερες του προβλεπόμενου ορίου, η κατανάλωση είναι χαμηλότερη και συνεπακόλουθα και η ισχύς. Υψηλό rpm αυξάνει την ισχύ ωστόσο αν ξεπεραστεί το επιτρεπόμενο εύρος υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης πλειάδας καταστροφικών συνεπειών. Έντονη μηχανική καταπόνηση, υπερθέρμανση, κρουστικός θόρυβος και φυσικά μείωση της διάρκειας ζωής του κινητήρα και των

επιμέρους τμημάτων του. Συνηθισμένο φαινόμενο είναι η εμφάνιση υπερστροφίας, με υπερβολική καταπόνηση εξαρτημάτων και εν γένει κίνδυνος αστοχίας όλης της μηχανής.

Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων στο σύστημα εξαγωγής ή αλλιώς γνωστή ως EGT (Exhaust Gas Temperature) αποτελεί αν όχι την σημαντικότερη, μια εκ των απαραίτητων παραμέτρων για την διεξαγωγή του performance. Η τιμή της αποτελεί ένδειξη αποτελεσματικότητας της καύσης, συμβάλει έγκαιρη διάγνωση και στην πρόληψη υπερθέρμανσης του A/K καθώς και στην οικονομία του καυσίμου. Προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης της υγείας του κινητήρα ενώ με κατάλληλη διαχείρισή της δύναται η ενίσχυση της ιπποδύναμης ή/και της ροπής.

Εκ των κρίσιμότερων τιμών όλης της διαδικασίας της δοκιμής, θεωρείται η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον στρόβιλο (TIT). Συνηθίζεται να μετράτε σε °C. Πολλές διαδικασίες επιτάσσουν την συλλογή μετρήσεων σε διαφορετικές τιμές TIT και βάσει αυτών εξάγονται τα τελικά αποτελέσματα για την παραγόμενη ώση ή ροπή, για την ειδική κατανάλωση καυσίμου και για την ροή του καυσίμου.

Σημαντικότερα μετρούμενα μεγέθη αποτελούν επίσης, τα Lab SG και Fuel LHV (*BTU/lb*). Η ειδική βαρύτητα καυσίμου και η θερμογόνος δύναμη επιδρούν άμεσα τόσο στο s.f.c. όσο και εντέλει στην αποδιδόμενη ισχύς. Το Lab SG αναφέρεται στην σχετική πυκνότητα του καυσίμου σε σχέση με το νερό. Αν η ειδική βαρύτητα του καυσίμου αυξηθεί, το καύσιμο χαρακτηρίζεται ως πιο πυκνό και άρα κάθε λίτρο του θα είναι σε θέση να παράξει περισσότερη ενέργεια. Επομένως υψηλό Lab SG, οδηγεί σε λιγότερη ειδική κατανάλωση καθότι επιτυγχάνεται παραγωγή ικανοποιητικής ισχύς καίγοντας λιγότερο καύσιμο. Μείωση της ειδικής βαρύτητας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του s.f.c., το οποίο μεταφράζεται ως απαίτηση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου για την παραγωγή αποδεκτής ισχύς. Κατ' αντιστοιχία, η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου η οποία εκφράζει την καθαρή ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την καύση, απαιτείται να διατηρείται σε υψηλές τιμές, καθότι μια υψηλή τιμή έχει σαν αποτέλεσμα την απελευθέρωση περισσότερης ενέργειας ανά μονάδα μάζας καυσίμου μειώνοντας το s.f.c. Επιπροσθέτως καύσιμο υψηλής θερμογόνου, βοηθάει τον κινητήρα να παράξει μεγαλύτερη ιπποδύναμη για την ίδια ποσότητα καυσίμου. Εν ολίγοις, τα δύο αυτά μεγέθη είναι επιθυμητό να χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές, καθότι η σχέση τους με την ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι αντιστρόφως ανάλογη.

Όλα τα ανωτέρω μεγέθη είναι ενδεικτικά, καθώς κάθε κινητήρας αντιμετωπίζεται σαν ξεχωριστή μονάδα με τις δικές του απαιτήσεις και ιδιαιτερότητες. Μπορεί να χρειαστεί η λήψη περισσότερων ή και λιγότερων μετρήσεων. Σε κάθε περίπτωση για οποιονδήποτε τύπο κι αν γίνεται αναφορά, στόχος είναι η επαρκής λήψη όλων των παραμέτρων που απαιτούνται από την βιβλιογραφία με σκοπό τη διόρθωση των τελικών αποτελεσμάτων και τη ρεαλιστική απεικόνιση της υγείας του αεριοστρόβιλου.

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση και Λειτουργία Ελικοστρόβιλου Κινητήρα: Χαρακτηριστικά και Έλεγχος Απόδοσης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκαν εκτενώς οι παράμετροι που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση των κινητήρων καθώς και η καθοριστική επιρροή των ισχυουσών περιβαλλοντικών συνθηκών στα μεγέθη ενδιαφέροντος.

Η θερμοκρασία εισόδου στον συμπιεστή (CIT), η πίεση εξόδου από αυτόν (CDP), η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στην είσοδο του στροβίλου (TIT), μεγέθη όπως το ειδικό βάρος καυσίμου (Lab SG) και η θερμογόνος δύναμη (Fuel LHV) εκπροσωπούν μερικές μόνο από το σύνολο των απαιτούμενων ληφθέντων μετρήσεων. Είναι πλέον κρίσιμο, η μελέτη να εστιάσει σε συγκεκριμένο τύπο κινητήρα για την βαθύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο κάθε ένα μέγεθος συμβάλει με καταλυτικό ή όχι τρόπο, μεμονωμένα ή σε συνδυασμό, στην συμπεριφορά και στις επιδόσεις του A/K και κατ' επέκταση στην ουσιαστικότερη κατανόηση των μοναδικών χαρακτηριστικών και απαιτήσεων λειτουργίας του.

Προχωρώντας την ανάλυση ένα βήμα παραπέρα, γίνεται εφαρμογή συγκεκριμένης διαδικασίας βάσει οδηγιών κατασκευαστή, εκτελώντας διόρθωση όλων των συλλεγμένων τιμών, υπολογισμός των απαιτούμενων μεγεθών ανάγοντας τα σε συνθήκες τυπικής μέρας και δημιουργία χρήσιμων διαγραμμάτων που προσδιορίζουν την κατάσταση υγείας είτε ολόκληρου του κινητήρα είτε συνιστωσών του.

3.1. Ο Ελικοστρόβιλος Κινητήρας

Αρκετά επιβατικά αεροσκάφη, αεροσκάφη στρατιωτικού τύπου καθώς και μεταγωγικά (Lockheed C130-Hercules (Lockheed Martin), χρησιμοποιούν ελικοστρόβιλους κινητήρες ως μέσο προώθησης. Αυτού του είδους οι κινητήρες όπως ήδη έχει αναφερθεί, χρησιμοποιούν έναν αεροκινητήρα για την περιστροφή μιας έλικας. Η έλικα επιταχύνει μεγάλες ποσότητες αέρα, η κίνηση της οποίας οφείλεται στην παραγομένη ροπή εξαιτίας της μετάδοσης του παραγόμενου μηχανικού έργου στον άξονα της μηχανής. Ένας μειωτήρας στροφών (RGB-Reduction Gearbox) φροντίζει για τη μετατροπή των υψηλών στροφών του στροβίλου σε κατάλληλες ταχύτητες για την περιστροφή της έλικας. Ο στρόβιλος λειτουργεί σε πολύ υψηλές ταχύτητες οι οποίες είναι απαγορευτικές για την ομαλή λειτουργία της και άρα κρίνεται αναγκαία η μείωση τους σε ένα αποδεκτό εύρος. Επιπλέον, το κιβώτιο ταχυτήτων είναι εφοδιασμένο με ένα προπελόφρενο το οποίο αποτρέπει την περιστροφή της έλικας όταν ο κινητήρας δεν είναι σε λειτουργία ή βρίσκεται σε αδράνεια, εξυπηρετώντας θέματα ασφαλείας.

Ένας κινητήρας τέτοιου τύπου γίνεται όλο και λιγότερο αποδοτικός με αύξηση της ταχύτητας του αεροσκάφους, επομένως γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση τους περιορίζεται σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλές ταχύτητες.

Από μαθηματικής σκοπιάς το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας των καυσαερίων αποδίδεται ως ισχύς στον άξονα που κινεί τον έλικα και ένα αρκετά μικρότερο ποσοστό τους παρέχεται υπό μορφή ώσης.

Συμβολίζοντας με θ τις συνθήκες της ελεύθερης ροής, με 1 τις συνθήκες στην έξοδο της προπέλας, c και e τις συνθήκες εισόδου στον συμπιεστή και εξόδου του στροβίλου αντίστοιχα, η βασική εξίσωση υπολογισμού της συνολικής δύναμης ώσης,

αν και δεν είναι δόκιμο η χρήση του όρου ώσης για την περίπτωση του ελικοστρόβιλου, δίνεται ακολούθως:

$$F = \dot{m}_0 \cdot V_1 - \dot{m}_0 \cdot V_0 + \dot{m}_e \cdot V_e - \dot{m}_c \cdot V_1$$

Όπου $\dot{m}_i V_i$ με $i = 0, 1, e, c$ συμβολίζουν τον ρυθμό ροής μάζας και την ταχύτητα της ροής σε κάθε έναν σταθμό.

Η προαναφερθείσα εξίσωση βασίζεται στην ανάλυση που παρουσιάζεται από την NASA (NASA, 2024). Ο ρυθμός ροής μάζας του αέρα διαμέσου της προπέλας, \dot{m}_0 , είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τη ροή της μάζας που πρόκειται να διαπεράσει το σώμα του κινητήρα, \dot{m}_c . Ακόμα, η ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων, V_e , δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή και θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σχεδόν ίση με την ταχύτητα της ροής του αέρα στην είσοδο του συμπιεστή, V_1 . Επίσης, ισότιμες θεωρούνται οι ροές μάζας προς και από τον κινητήρα (\dot{m}_c , \dot{m}_e). Εξαιτίας όλων των παραπάνω, η εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί περισσότερο και να αποκτήσει νέα μορφή:

$$F = \dot{m}_0 \cdot (V_1 - V_0) + \dot{m}_e \cdot (V_e - V_1)$$

Η με λόγια, η δύναμη ώσης σε έναν ελικοστρόβιλο, είναι ίση με το άθροισμα της ώσης που προέρχεται από την προπέλα (το γινόμενο της ροής μάζας που διακινεί η προπέλα και της διαφοράς των ταχυτήτων της ροής στην είσοδο και την έξοδό της) και της ώσης που παράγεται από την εκτόνωση των καυσαερίων (το γινόμενο της ροής μάζας στην έξοδο του κινητήρα και της διαφοράς στην ταχύτητα του ρευστού πριν και μετά από αυτόν).

Συνήθως οι προπέλες αποτελούνται από δύο έως έξι μακριά και λεπτά πτερύγια. Κατά την περιστροφή τους, η ταχύτητα της βάσης είναι διαφορετική από αυτήν της κορυφής, με τον αέρα να κινείται πολύ πιο γρήγορα στις απολήξεις τους. Για να μπορέσουν να είναι όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά, συνηθίζεται η γεωμετρία τους να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποκτά μια στρέβλωση. Η γωνία προσβολής των αεροτομών που συνθέτουν την βάση και την κορυφή του πτερυγίου, διαφέρει μεταξύ αυτών των δύο περιοχών, με υψηλότερες τιμές να προτιμώνται στην βάση, εξαιτίας της διαφοροποίησης της ταχύτητας. Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά, αυξάνουν κατά πολύ τις απαιτήσεις και τον βαθμό δυσκολίας ανάλυσης των αεροδυναμικών φαινομένων της προπέλας, ωστόσο, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, δεν θα γίνει περαιτέρω εμβάθυνση.

Από μακροσκοπικής άποψης, η έλικα μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί ως ένας δίσκος, μέσα από τον οποίο θα διέλθει ο περιβάλλοντας αέρας. Καθώς ο κινητήρας περιστρέφει την προπέλα, δημιουργείται μια διαφορά πίεσης κατάντη και ανάντη αυτού του νοητού δίσκου. Κάνοντας μια γρήγορη επισκόπηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα γύρω από την επιφάνεια μιας αεροτομής, είναι γνωστό πως η τιμή της πίεσης πάνω από το σώμα της είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη τιμή της κάτω πλευράς. Αν στην προηγούμενη πρόταση, συμπεριληφθεί και η επίδραση της περιστροφικής κίνησης των πτερυγίων της έλικας, τότε η ροή η οποία βρίσκεται μπροστά της, θα διακατέχεται από χαμηλότερη πίεση από αυτήν την ατμοσφαιρικής, ενώ η ροή του αέρα πίσω από τα πτερύγια θα χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πίεση σε σύγκριση με αυτήν που επικρατεί στην ελεύθερη ροή μακριά από τον κινητήρα.

Όμως η ταχύτητα του αέρα κατά την έξοδο του από την προπέλα, είναι αυξημένη σε σχέση με την ταχύτητα της ελεύθερης ροής, εξαιτίας της ενέργειας που του μεταφέρεται λόγω της περιστροφής της έλικας, επιταχύνοντάς τον.

Πέραν του θεωρητικού υπόβαθρου, είναι χρήσιμο να παρατεθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν όσα αναλύθηκαν ανωτέρω. Θα γίνει χρήση της εξίσωσης Bernoulli, αλλά μόνο σε ροϊκές περιοχές που αφορούν το χώρο είτε μπροστά είτε πίσω από την έλικα. Κατά μήκος αυτού του φανταστικού δίσκου, η εξίσωση Bernoulli δεν μπορεί να εφαρμοστεί, διότι η εξίσωση προϋποθέτει η ενέργεια κατά μήκος μιας ροϊκής γραμμής να παραμένει σταθερή, γεγονός που παραβιάζεται καθότι η προπέλα προσθέτει ενέργεια στην ροή.

Η δύναμη ώσης F θα ισούται με:

$$F = \Delta p \cdot A$$

Σε περιοχή μπροστά της πτερύγωσης η συνολική πίεση p_{t0} , θα ισούται με την στατική πίεση, p_0 συν την δυναμική.

$$p_{t0} = p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα και V_0 η ταχύτητα του αεροσκάφους. Κατάντη του δίσκου ισχύει:

$$p_{te} = p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_e^2$$

Όπου p_{te} , V_e η συνολική πίεση και ταχύτητα της εξόδου. Γνωρίζοντας ότι διαφορά της πίεσης της περιοχής της προπέλας δίνεται από την σχέση:

$$\Delta p = p_{te} - p_{t0}$$

υπολογίζεται:

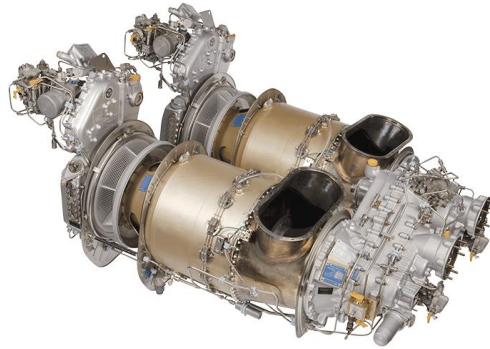
$$\Delta p = p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_e^2 - p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2$$

Αντικαθιστώντας την διαφορά πίεσης στην εξίσωση της δύναμης ώσης τελικώς λαμβάνεται ότι:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot [V_e^2 - V_0^2]$$

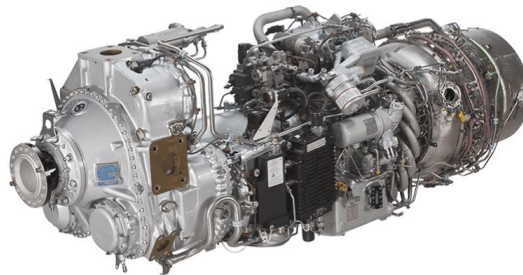
Η εύρεση της ταχύτητας εξόδου, μπορεί να προσδιοριστεί αξιοποιώντας την εξίσωση της ορμής.

Μερικοί αντιπροσωπευτικοί κινητήρες της οικογένειας των ελικοστρόβιλων είναι η σειρά PT-6 με κατασκευάστρια εταιρία την Pratt & Whitney Canada. Ακολουθεί σχετική φωτογραφία του PT6-TWIN:



*Σχήμα 3.1. Κινητήρας PT6-TWIN
(Pratt & Whitney)*

Ο PW-100 της ίδια κατασκευάστριας εταιρίας:



*Σχήμα 3.2. Κινητήρας PW-100
(Pratt & Whitney)*

Η ο PW123 και αυτός της εταιρίας Pratt & Whitney Canada.



*Σχήμα 3.3. Κινητήρας PW-123
(National and Air Space Museum Smithsonian)*

Σπουδαίος πρεσβευτής της κατηγορίας των ελικοστρόβιλων θεωρείται και η οικογένεια των κινητήρων Allison T56. Αρχικά σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν από την αμερικάνικη εταιρεία Alison Engine Company στην δεκαετία του 1950 και χρησιμοποιήθηκαν τόσο σε πολιτικά όσο και σε στρατιωτικά αεροσκάφη. Η σειρά προοριζόταν για την υποστήριξη του αεροσκάφους Lockheed C-130 Hercules, το οποίο παραμένει μέχρι και σήμερα ένα από τα πιο εμβληματικά και ευρέως χρησιμοποιούμενα στρατιωτικά αεροσκάφη σε παγκόσμια κλίμακα. Η εταιρία εξαγοράστηκε το 1995 έναντι του ποσού περίπου των 525 εκατομμυρίων δολαρίων από την Rolls-Royce στην προσπάθεια της δεύτερης, να ενισχύσει την παρουσία της στην αμερικανική αεροπορική και στρατιωτική αγορά. Με την εξαγορά αυτή, η ιστορική βρετανική εταιρία, ενίσχυσε το χαρτοφυλάκιό της, με την απόκτηση της ήδη καταξιωμένης σειράς των T56 (L.A. Times Archives, 1994). Η Allison συνέχισε για κάποιο χρονικό διάστημα να λειτουργεί ως θυγατρική εταιρία με το όνομα Rolls-Royce Allison, δεν άργησε ωστόσο να ενσωματωθεί πλήρως στο εμπορικό σήμα της Rolls-Royce.

Η σειρά των T56 έχει δύο εκδόσεις, εκ των οποίων η μια προορίζεται για πολιτική χρήση ενώ η άλλη για στρατιωτικές εφαρμογές. Ο τύπος T56 501-D και όλες οι αναβαθμίσεις του, αφορούν το πολιτικό νηολόγιο, ενώ ο τύπος T56-A στελεχώνει στρατιωτικά αεροσκάφη όπως μεταγωγικά ή ναυτικής συνεργασίας (Lockheed P-3 Orion).

Η ΠΑ διαθέτει στο στόλο της έναν αριθμό αεροσκαφών τύπου C-130 Hercules τα οποία φέρουν είτε τον τύπο T56-A-7B είτε τον T56-A-15. Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο παραλλαγών έγκειται στη διαφοροποίηση του εύρους των θερμοκρασιών λειτουργίας τους (Πολεμική Αεροπορία).

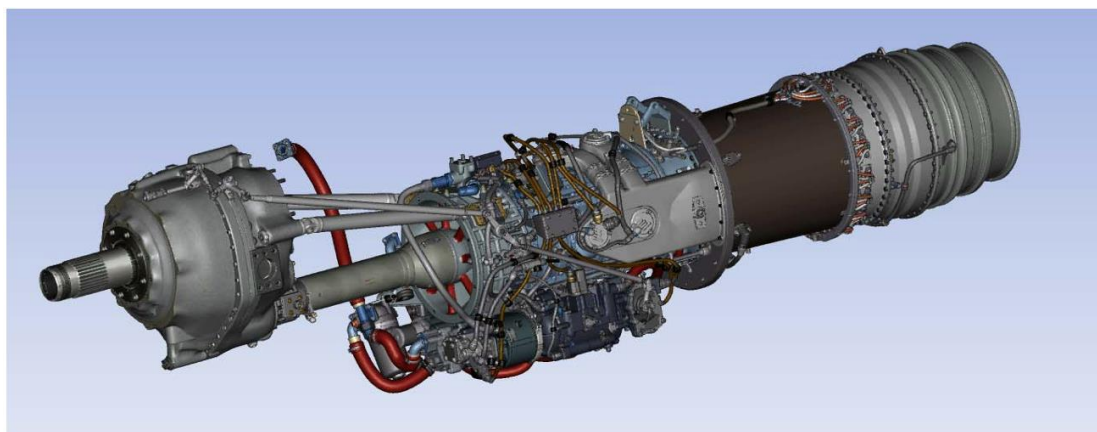
3.2. Χρήση και Χαρακτηριστικά Λειτουργίας T56-A-15

Η συγκεκριμένη έκδοση, όπως ήδη έχει αναφερθεί, εντοπίζεται στο αεροσκάφος Lockheed C-130H Hercules. Πρόκειται για ένα τετρακινητήριο μεταγωγικό, ικανό να εκτελέσει αποτελεσματικά ένα μεγάλο εύρος αποστολών, γεγονός που δικαιολογεί την αδιάκοπη παραγωγή του για πάνω από μισό αιώνα.



*Σχήμα 3.4. C-130H Hercules
(ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε.)*

Ακολουθούν εν συντομία μερικές χρήσιμες πληροφορίες. Το πλήρωμά του στελεχώνεται από πέντε άτομα, έχει εκπέτασμα πτερύγων ίσο με 40.4 m και φτάνει σε μήκος τα 29.8m, η μέγιστη ταχύτητά του αγγίζει τα 621km/hr, ενώ έχει δυνατότητα πτήσης στα 23,000 πόδια με φορτίο και τα 33,000 πόδια χωρίς.



*Σχήμα 3.5. Κινητήρας T56-A-15
(NATO)*

Σε κάθε πτέρυγα τοποθετούνται δύο κινητήρες τύπου T56-A-15, βάρους 1825lb ή 827.80kg ο κάθε ένας (Rolls Royce, 2001), που σημαίνει ότι ο συνολικός αριθμός των κινητήρων του αεροσκάφους ανέρχεται σε τέσσερις. Για κάθε έναν τύπο, συλλέγονται δεδομένα σε τέσσερις διαβαθμίσεις θερμοκρασίας, οι οποίες αντιστοιχούν σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα ισχύος, όπως αυτά έχουν προβλεφθεί από τον κατασκευαστή. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στο 75% της ονομαστικής ισχύος, στο 90%, στην κατάσταση Military η οποία αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη ισχύ σε πιο απαιτητικές φάσεις της πτήσης όπως σε περίπτωση κάποιου ελιγμού και τέλος στην κατάσταση Take-Off η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποδώσει και κατ' επέκταση να αντέξει ο κινητήρας. Η κατάσταση αυτή είναι διαθέσιμη για περιορισμένο χρονικό διάστημα καθώς καταπονεί σημαντικά τον κινητήρα και τα επιμέρους εξαρτήματά του.

Για τις φάσεις του 90% Normal και του Take-Off, η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον στρόβιλο γνωστή ως TIT, ανέρχεται για την πρώτη περίπτωση στους 1850°F ή 1010°C, ενώ για την δεύτερη φτάνει τους 1970°F ή 1077°C (EPA-United States Environmental Protection Agency, 1971).

Οι απαιτήσεις για ελάχιστη συνολική ισχύ, κάνοντας λόγο για το άθροισμα της μηχανικής ισχύος που παράγεται στον άξονα και της πρόσθετης ώσης από την εκτόνωση των καυσαερίων (ESHP-Equivalent Shaft Horse Power) για τις αναγραφόμενες θερμοκρασίες, κυμαίνονται σε 4365 shp και 4910 shp αντίστοιχα (EPA-United States Environmental Protection Agency, 1971).

Η δύναμη ώσης που παράγεται, ισούται με 760lb για τους 1010°C και 797 για τους 1077°C, εντούτοις θεωρείται αμελητέα (EPA-United States Environmental Protection Agency, 1971).

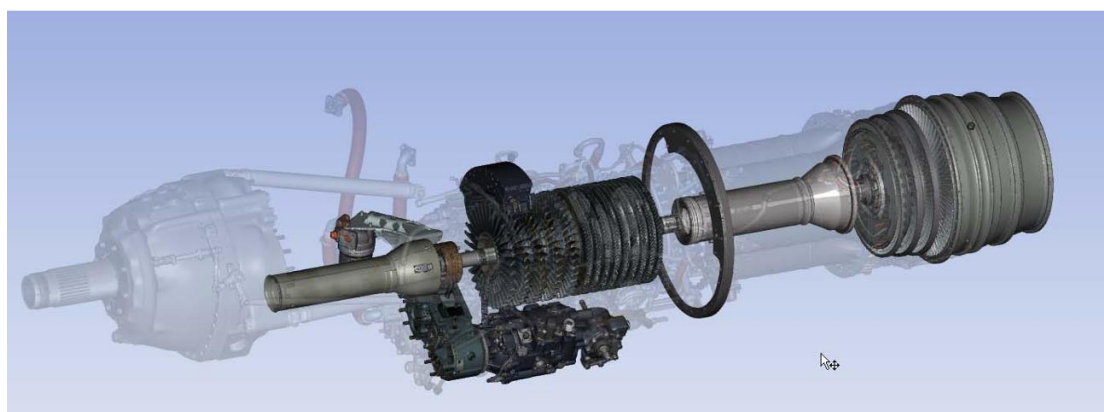
Η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα του κινητήρα αγγίζει τις 13,820 rpm σταθερά, οι οποίες φυσικά υπόκεινται στην απαραίτητη μείωση από το κιβώτιο ταχυτήτων (RGB) για την ομαλή λειτουργία της προπέλας και κατ' επέκταση του συνόλου του συστήματος (EPA-United States Environmental Protection Agency, 1971). Ο λόγος μετάδοσης είναι 13.54:1, που μεταφράζεται ότι για κάθε 13.54 στροφές του άξονα, η έλικα θα εκτελεί 1 στροφή (Rolls Royce, 2001).

Ο τύπος λιπαντικού που χρησιμοποιείται πληροί τις στρατιωτικές προδιαγραφές MIL-L-23699 (Rolls Royce, 2001).

Η ροή του εισερχόμενου αέρα υπολογίζεται σε 33lb/hr ενώ η επιθυμητή ροή καυσίμου (Fuel Flow) υπολογίζεται σε 2260lb/hr για την φάση του 90% Normal και 2460lb/hr για το Take-Off (EPA-United States Environmental Protection Agency, 1971). Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι τύπου JP8 (Middle East Propulsion Company Ltd). Το JP8 είναι το στρατιωτικό ισοδύναμο του Jet A-1 παράγωγο της διύλισης αργού πετρελαίου, εμπλουτισμένο με πρόσθετα για την πρόληψη διάβρωσης και την αποφυγή σχηματισμού πάγου. Πληροί όλες τις προδιαγραφές όπως αυτές επιτάσσονται από την στρατιωτική προδιαγραφή των Ηνωμένων Πολιτειών MIL-T-831858D (Air Force Petroleum Office, 1992), ενώ παράλληλα αποτελεί τον κύριο τύπο καυσίμου πολλών αεροσκαφών που χρησιμοποιούνται από τις αεροπορικές δυνάμεις του NATO (Shell Global).

Το κύριο τμήμα του κινητήρα αποτελούμενο από τον συμπιεστή (compressor), τον διαχύτη (diffuser), το τμήμα του θαλάμου καύσης (combustor), τον στρόβιλο (turbine) και τέλος το ακροφύσιο (exhaust nozzle) συνθέτει το Power Section. Με άλλα

λόγια το Power Section, όπως καταμαρτυρά και το όνομα του, είναι το βασικό τμήμα του κινητήρα που παράγει την κύρια ισχύ και επιφορτίζεται με την μετατροπή της ενέργειας των εκτονωμένων καυσαερίων σε μηχανικό έργο άξονα, γενεσιουργός αιτία της πρόωσης του αεροσκάφους. Είναι εξοπλισμένος με έναν αξονικό συμπιεστή δεκατεσσάρων βαθμίδων σχεδιασμένος να αποδίδει λόγο συμπίεσης περίπου ίσο με 9.5:1 (EPA-United States Environmental Protection Agency, 1971). Ο συμπιεστής ενώνεται απευθείας με τη χρήση μόνο ενός άξονα, με τον αποτελούμενο από τέσσερις βαθμίδες στρόβιλο. Το τμήμα του θαλάμου καύσης το πλαισιώνουν έξι θάλαμοι περιμετρικά του άξονα (EPA-United States Environmental Protection Agency, 1971). Ακολουθεί σχετική φωτογραφία στην οποία μπορεί κανείς να διακρίνει τα τμήματα όπως περιεγράφηκαν.



*Σχήμα 3.6. Κινητήρας T56-A-15
(NATO)*

3.3. Διαδικασία Ελέγχου Επιδόσεων

Η διαδικασία ελέγχου των επιδόσεων ενός Α/Κ για την εξακρίβωση της υγείας του και εντέλει της αξιολόγησής του ως αξιόπιστου ή μη, είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί την τήρηση αυστηρών πρωτοκόλλων και εξειδικευμένου εξοπλισμού. Θα μπορούσε να πει κανείς πως η λήψη των απαιτούμενων μετρήσεων για τις μετέπειτα διορθωτικές εξισώσεις, είναι μονάχα η κορυφή του παγόβουνου. Προτού ο κινητήρας φτάσει στο σημείο να μπορεί να αποδώσει αξιόπιστα αποτελέσματα θερμοκρασιών, πιέσεων και όλων των κρίσιμων τιμών ενδιαφέροντος, ακολουθείται με ευλάβεια μια λεπτομερής και προσεκτικά σχεδιασμένη διαδικασία ελέγχου και συνδεσμολογίας, η οποία περιγράφεται λεπτομερώς στην τεχνική βιβλιογραφία που συνοδεύει τον κάθε κινητήρα.

Το συνοδευτικό αυτό τεχνικό εγχειρίδιο (T.O. Technical Order), χωρίς ψήγμα υπερβολής, δύναται να χαρακτηριστεί ως το Ευαγγέλιο του Μηχανικού. Σε αυτό περιέχονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες και οδηγίες για την λειτουργία, συντήρηση, επισκευή και δοκιμή του κινητήρα. Είναι ένα επίσημο και λεπτομερές έγγραφο που εκδίδεται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Παρέχει γενικές πληροφορίες για την κατασκευάστρια εταιρία, αναφέρει όλα τα εξαρτήματα που απαρτίζουν την μηχανή (RGB, συμπιεστής, σύστημα καυσίμου, στρόβιλος κ.λπ.) καθώς και τον τρόπο λειτουργίας τους. Αναλύει όλες τις διαδικασίες συντήρησης, από την περίπτωση της

γενικής επισκευής μέχρι τις περιπτώσεις περιοδικών ελέγχων και στοχευμένων εργασιών συντήρησης. Περιλαμβάνονται οδηγίες για την αποσυναρμολόγηση και επανασυναρμολόγηση τόσο του ίδιου του κινητήρα όσο και των επιπρόσθετων εξαρτημάτων του, όπως επίσης οδηγίες για σωστή ζυγοστάθμιση και καλιμπραρίσματος των επιμέρους συστημάτων με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης. Παρέχει βήμα προς βήμα τις οδηγίες για τις δοκιμές που αφορούν την επαλήθευση της ομαλής και ασφαλούς λειτουργίας του με αναγραφόμενες όλες τις διορθωτικές εξισώσεις που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, συνοδευόμενες από εξηγηματικά παραδείγματα για την διασφάλιση αποφυγής οποιουδήποτε λάθους. Περιέχονται επιπλέον τεχνικά σχέδια με πολυάριθμες τομές και όψεις του κινητήρα, διαγράμματα και αριθμητικοί πίνακες. Αναφέρονται διεξοδικά οι τρόποι αντιμετώπισης ποικίλων προβλημάτων που πιθανότητα να προκύψουν (Troubleshooting) και παρέχονται αναλυτικές οδηγίες αντιμετώπισής τους, στοχεύοντας πρώτα στη αναγνώριση του σφάλματος και έπειτα στην αποκατάστασή του. Τέλος, συμπεριλαμβάνονται οδηγίες για την ασφαλή διαχείριση του κινητήρα και τις προβλεπόμενες ενέργειες σε περίπτωση βλάβης, ατυχήματος ή οποιασδήποτε έκτακτης ανάγκης κατά την συντήρηση ή την δοκιμή του.

Μόλις ο κινητήρας αφιχθεί στους χώρους που θα λάβει χώρα η δοκιμή του, διενεργείται ένας πρωταρχικός οπτικός έλεγχός του. Σε πρώτη ανάλυση μοιάζει ένα αρκετά απλό και χρονοβόρο βήμα. Ωστόσο ένας τέτοιος έλεγχος αποσκοπεί στην εύρεση τυχόν φθορών ή ανωμαλιών που μπορεί να έχουν συμβεί κατά την μεταφορά του και που σε μελλοντικό χρόνο η μη ανίχνευσή τους θα διακύβευε την ομαλή εξέλιξη της προετοιμασίας του κοστίζοντας πόρους, τόσο σε χρόνο όσο και σε χρήματα.

Εφόσον η εικόνα του κινητήρα δεν εγείρει κάποιον προβληματισμό και θεωρηθεί καλή, τοποθετείται στην κατάλληλη κλίνη δοκιμής, ακολουθεί η τοποθέτηση βοηθητικού εξοπλισμού απαραίτητου για την φάση της δοκιμής και στη συνέχεια είναι έτοιμος να μεταφερθεί εντός του Test Cell, όπου και εκεί θα πραγματοποιηθεί η τελική του συνδεσμολογία με τις υπάρχουσες καλωδιώσεις του χώρου. Το Test Cell είναι ένας εξειδικευμένος θάλαμος δοκιμών, σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρει ένα περιβάλλον απολύτως ελεγχόμενο για την προστασία τόσο του κινητήρα όσο και του προσωπικού το οποίο επωμίζεται την ασφαλή μεταχείρισή του και την εκτέλεση των δοκιμών απόδοσης και αξιολόγησης. Εκεί ο κινητήρας αφού ασφαλιστεί στην θέση του, θα τοποθετηθούν ειδικές σωληνώσεις για την παροχή αέρα, καυσίμου και ελαίου καθώς και οι απαραίτητοι αισθητήρες για τη λήψη σημάτων σε ό,τι αφορά πιέσεις, θερμοκρασίες, ροή καυσίμου και κραδασμών.

3.4. Περιγραφή της Διαδικασίας Δοκιμής

Έχοντας ολοκληρωθεί η πρώτη φάση προετοιμασίας του κινητήρα, ακολουθεί η ενεργοποίηση της κονσόλας και όλων των συστημάτων που την υποστηρίζουν, βεβαιώνοντας τη σωστή λειτουργία τους. Στην συνέχεια, διασφαλίζεται ότι όλα τα μετρητικά όργανα της κονσόλας είναι πιστοποιημένα και δείχνουν τις αναμενόμενες τιμές πριν την έναρξη της δοκιμής. Για παράδειγμα, δεν θα μπορούσε να γίνει αποδεκτή μια ένδειξη που παραπέμπει σε καλοκαιρινές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του χειμώνα, καθώς μια τέτοια ένδειξη δεν συνάδει με τις κλιματολογικές συνθήκες της εποχής. Επομένως μια τέτοια απόκλιση υποδηλώνει πιθανή δυσλειτουργία του μετρητικού οργάνου. Άρα επιβεβαιώνεται με αυτόν τον τρόπο η ακρίβεια και η αξιοπιστία των επερχόμενων μετρήσεων, εξασφαλίζοντας ότι όλα τα όργανα λειτουργούν εντός των προβλεπόμενων προδιαγραφών (καλιμπράρισμα).

Το προσωπικό απαραίτητα επενεργεί διεξοδικό έλεγχο μέσα στον χώρο της δοκιμής για τυχόν ύπαρξη ξένων αντικειμένων (FOD Walk-Foreign Object Damage) τα οποία μπορούν να αποβούν επικίνδυνα κατά τη λειτουργία του κινητήρα και να καταστούν υπεύθυνα για τη δημιουργία σοβαρότατων βλαβών στο σώμα του, στους χώρους της δοκιμής ή ακόμα και για την πρόκληση εργατικών ατυχημάτων.

Σε πρώτο στάδιο γίνεται η περιστροφή του κινητήρα χωρίς ανάφλεξη η οποία προσφέρει τη δυνατότητα πολλαπλών ελέγχων ασφαλείας. Κατά τη διάρκεια της προ-εκκίνησης, διαπιστώνονται πρώτα η πίεση του ελαίου σε όλο το σύστημα του κινητήρα και δεύτερον οι πιέσεις των επιστροφών. Απεμπλέκοντας τη βαλβίδα του αέρα, εξειδικευμένο προσωπικό εισέρχεται στον χώρο δοκιμής για την επενέργεια ακουστικού ελέγχου για την ύπαρξη τυχόν ασυνήθων θορύβων. Ένας ασυνήθης θόρυβος θα μπορούσε να προέρχεται λόγω χάρη από το τμήμα του συμπιεστή ή του στρόβιλου κατά την επαφή των πτερυγίων των κινητών βαθμίδων με το κέλυφος του κινητήρα. Παραμένοντας στον χώρο του Δοκιμαστηρίου με την χρήση φακού, γίνεται παρακολούθηση της εισόδου και εξόδου του αεροκινητήρα για τυχόν ευρήματα.

Ολοκληρώνοντας με επιτυχία τα παραπάνω, ο κινητήρας είναι έτοιμος για εκκίνηση. Ενεργοποιείται η βαλβίδα η οποία διοχετεύει αέρα από τα αεριοφυλάκια του Δοκιμαστηρίου στον εκκινητήρα αέρα που βρίσκεται εγκατεστημένος στον μειωτήρα στροφών (RGB) και παρατηρώντας τις στροφές του κινητήρα τόσο ψηφιακά όσο ποσοστιαία (%), ενεργοποιείται εντέλει το σύστημα καυσίμου και το σύστημα ανάφλεξης. Η βιβλιογραφία επιτάσσει παράλληλα την παρακολούθηση του συνολικού χρόνου εκκίνησης του κινητήρα. Όταν ο κινητήρας έχει ξεκινήσει, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην θερμοκρασία αέρα εισόδου στον στρόβιλο (TIT), η οποία μέχρι ο κινητήρας να αναλάβει μόνος του απενεργοποιώντας την βοήθεια της παροχής αέρα του Δοκιμαστηρίου, δεν θα πρέπει να υπερβεί το αναγραφόμενο στις τεχνικές οδηγίες όριο. Σε περίπτωση που το μετρητικό όργανο δείξει ότι ο κινητήρας έχει την τάση να το υπερβεί (θερμή εκκίνηση), απενεργοποιείται η ανάφλεξη και η παροχή του καυσίμου και θα πρέπει ο κινητήρας να περιστραφεί έως ότου οι θερμοκρασίες πέσουν σε επιθυμητά επίπεδα.

Εφόσον η εκκίνηση είναι εντός ορίων, ένας χειριστής έχει υπό την ευθύνη του την λειτουργία του κινητήρα και ένας δεύτερος επιφορτίζεται με την παρακολούθηση

των μετρήσεων. Αν όλες οι μετρήσεις συμμορφώνονται με τις υποδείξεις της βιβλιογραφίας, ένας εκ των δοκιμαστών, τηρώντας όλα τα μέτρα ασφαλείας και φορώντας τα προβλεπόμενα μέτρα προστασίας, θα μεταβεί στο χώρο της δοκιμής και θα ελέγξει για τυχόν διαρροές στα συστήματα αέρα, ελαίου και καυσίμου. Μικρο-ευρήματα μπορούν να διορθωθούν ακόμα και κατά την λειτουργία του κινητήρα, αλλιώς ανάλογα με την περίπτωση ο κινητήρας θα πρέπει να απενεργοποιηθεί ή ακόμα και να απορριφθεί αν η σοβαρότητα των ευρημάτων είναι τέτοια που δεν αφήνει περιθώρια για περαιτέρω διορθωτικές ενέργειες.

Στην συνέχεια γίνεται η τοποθέτηση της έλικας, σύνδεσή της μηχανικά και ηλεκτρικά, λειτουργικός της έλεγχος, συσχέτιση χειριστηρίων κονσόλας και κινητήρα (ringing) και πλέον ο A/K είναι έτοιμος για τον λειτουργικό έλεγχο και τον έλεγχο αποδόσεώς του. Σημειώνεται, ότι για μια ακόμη φορά θα ακολουθήσει οπτικός έλεγχος στην είσοδο και την έξοδο και έλεγχος εντός του χώρου για άγνωστα αντικείμενα (FOD Walk).

Σειρά έχει η διαδικασία της εκκίνησης, ακριβώς όπως περιεγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο και ακολούθως ο λειτουργικός έλεγχος, κατά τη διάρκεια του οποίου ελέγχονται υποσυστήματα του αεροκινητήρα, αυτοματισμοί και η συμπεριφορά είτε στο μηχανικό είτε στο ηλεκτρικό μέρος. Αν όλες οι καταγραφές συνεχίζουν να είναι εντός ορίων, λαμβάνει χώρα ο έλεγχος απόδοσης με γνώμονα τέσσερα σημεία τα οποία ορίζονται από την θερμοκρασία αέρα εισαγωγής στον στρόβιλο και επιπλέον δευτερεύοντες έλεγχοι, όπως αξιολόγηση επιταχύνσεως, επιβραδύνσεως και τυχόν ύπαρξη μικροφλογιδίων στον χώρο τον καυσαερίων (torching).

Σε αυτό το σημείο ο κινητήρας θα πρέπει να σταματήσει τη λειτουργία του και όσο οι Δοκιμαστές αξιολογούν τα αποτελέσματα του ελέγχου, δευτερεύον προσωπικό θα ελέγξει τα φίλτρα καυσίμου και ελαίου και στα δύο μέρη του κινητήρα (RGB-Power Section). Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα δεν βαδίζουν σύμφωνα με την βιβλιογραφία, πραγματοποιείται επιπλέον διερεύνηση με συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων φορέων, για τα αίτια της αστοχίας. Στην αντίθετη περίπτωση, θα αφαιρεθεί η προπέλα, θα ελεγχθεί για μια ακόμη φορά ο χώρος, η εισαγωγή και η εξαγωγή του κινητήρα και μια νέα εκκίνηση θα λάβει χώρα έτσι ώστε να διασφαλιστεί πλήρως ότι ο κινητήρας δεν έχει διαρροή σε κανένα από τα συστήματά του.

Σε κάθε σβήσιμο της μηχανής, ένας δοκιμαστής συλλέγει λάδι από τον κινητήρα το οποίο αποστέλλεται για φασματοσκοπικό έλεγχο στο εργαστήριο της εταιρίας. Αν οι τιμές είναι εντός αποδεκτών ευρών, πραγματοποιείται αντιδιαβρωτική προστασία στο σύστημα καυσίμου η οποία επιτυγχάνεται με παροχή ενός μίγματος ελαίου-καυσίμου, μόνο με περιστροφή χωρίς ανάφλεξη.

Ο κινητήρας είναι έτοιμος για αποσύνδεση από τον χώρο δοκιμής. Μεταφέρεται στο χώρο προετοιμασίας, όπου εκεί αφαιρείται ο βοηθητικός εξοπλισμός του Δοκιμαστηρίου (slave equipment) και οι συρματασφαλίσεις όπου απαιτείται. Τέλος, τοποθετείται στην ειδική κλίνη μεταφοράς για την τελική επιθεώρηση.

Κεφάλαιο 4: Διαδικασία Υπολογισμού Επιδόσεων

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε εκτενής αναφορά για τις τιμές που απαραίτητα θα πρέπει να ληφθούν με σκοπό τη διάγνωση της γενικότερης κατάστασης του κινητήρα.

Η αεροπορική βιομηχανία είναι ένας ταχέα αναπτυσσόμενος κλάδος, που οφείλει να προσαρμόζεται συνεχώς σε νέες τεχνολογίες και να καινοτομεί, με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας των προϊόντων της, μα πρωτίστως την ενίσχυση όλων των παραμέτρων ασφαλείας.

Μια από τις πιο σημαντικές εξελίξεις είναι η ανάπτυξη έξυπνων αλγορίθμων που παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση τόσο των κινητήρων όσο και του ίδιου του αεροσκάφους. Η νέα γενιά αεροσκαφών είναι πλέον εξοπλισμένη με χιλιάδες αισθητήρες, παρέχοντας στις αεροπορικές εταιρίες έναν πρωτοφανή όγκο πληροφοριών που αφορά την απόδοση των κινητήρων μέχρι την πίεση των ελαστικών και τη θερμοκρασία της καμπίνας. Υπάρχουν λογισμικά που είναι σε θέση να παρέχουν μέχρι και 400,000 τιμές διαφορετικών παραμέτρων (oases, 2023). Συλλέγοντας όλον αυτόν τον όγκο δεδομένων, οι κατασκευάστριες εταιρίες είναι ικανές να προβλέψουν οποιαδήποτε ανάγκη συντήρησης, αποτρέποντας πιθανές απρογραμμάτιστες καθυστερήσεις.

Η συλλογή μετρήσεων στην αεροπλοΐα δεν είναι μια συνήθεια που υιοθετήθηκε τη σύγχρονη εποχή. Ήδη από το 1926 οι αδερφοί Wright κρατούσαν ημερολόγια πτήσης όπου εισήγαγαν πληροφορίες για τα επίπεδα καυσίμου και λαδιού και την εμφάνιση τυχόν απρόβλεπτων γεγονότων. Με το πέρασμα των χρόνων και την αλματώδη ανάπτυξη των τεχνολογικών εφαρμογών, η αυτοματοποίηση της συλλογής, καταγραφής και μεταφοράς όλων των κρίσιμων δεδομένων, οδήγησε στην λεπτομερέστατη χαρτογράφηση οποιαδήποτε στιγμή, όλων των συνιστωσών του πτητικού μέσου. Υπερσύγχρονοι αισθητήρες συμπληρώνουν τους κινητήρες και τα ίδια τα αεροσκάφη και η δυνατότητα εξασφάλισης υψηλής επεξεργαστικής ισχύς, επιτρέπει την ανάλυση όλων των καταγραφόντων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η Rolls-Royce πρωτοστάτησε την δεκαετία του 1990, με την ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης της υγείας των κινητήρων της (oases, 2023).

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια ανάπτυξης ενός λογισμικού, με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB, το οποίο σαν είσοδο θα δέχεται όλες τις τιμές όλων των παραμέτρων που είναι χρήσιμες για την εξαγωγή πορίσματος για την κατάσταση (status) του κινητήρα και σαν έξοδο θα παρέχει τα διορθωμένα αποτελέσματα βάσει των οδηγιών της βιβλιογραφίας, πλαισιωμένα από χρήσιμα διαγράμματα για τη συμπεριφορά του συμπιεστή, της διορθωμένης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (corrected s.f.c.), της διορθωμένης ιπποδύναμης (corrected hp) και της διορθωμένης ροής καυσίμου (corrected FF) συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στον στρόβιλο.

Το λογισμικό δέχεται εισόδους και εξάγει αποτελέσματα για τρεις διαφορετικούς τύπους του ίδιου κινητήρα, τον T56-A-15 (Series IV), ο οποίος φέρεται από τα μεταγωγικά αεροσκάφη της ΠΑ C-130H Hercules, τον T56-A-14 (Series IV) που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πρόωσης των ναυτικών αεροσκαφών Lockheed P3-Orion και τον τύπο T56-A-7B (Series II) που αξιοποιείται σε παλαιότερες εκδόσεις του C-130. Οι τύποι A-15 και A-14 έχουν ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους, κυρίως σε

δομικό επίπεδο και λειτουργούν στις ίδιες θερμοκρασίες. Ο τύπος A-7B λειτουργεί σε χαμηλότερες TIT και έχει μικρότερη απόδοση ισχύος. Οπτικά, οι τρεις κινητήρες δεν ξεχωρίζουν μεταξύ του και μόνο ένα έμπειρο μάτι με πολυετή εμπειρία στο χώρο θα μπορούσε να τους ξεχωρίσει.

4.1. Οφέλη Χρήσης Λογισμικού

Η ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας και η ενσωμάτωση νεότερων και πιο αποδοτικών τεχνολογικών μεθόδων καθιστούν απαραίτητη την υιοθέτηση νέων και σύγχρονων διαδικασιών για την καταγραφή των αναγκαίων μετρήσεων. Η παλαιότερη νοοτροπία συλλογής των ενδείξεων, απαιτούσε τη χειροκίνητη καταγραφή τους και γινόταν χρήση αναλογικού και όχι ψηφιακού εξοπλισμού. Επομένως η διαρκής επανεξέταση και αναβάθμισή του, είναι ουσιαστική για τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας και της αξιοπιστίας.

Κάνοντας χρήση ενός εξοπλισμού ο οποίος παρέχει αναλογικές ενδείξεις, λαμβάνεται ένας περιορισμένος αριθμός μετρήσεων οι οποίες, να μεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της βιβλιογραφίας, πλην όμως παρέχουν μια αρκετά περιορισμένη και φτωχή εικόνα για την κατάσταση του εκάστοτε κινητήρα. Η παραγόμενη πληροφορία αποτυπώνει μονάχα τα κρίσιμα μεγέθη και η αξιοποίησή της περιορίζεται στον υπολογισμό της αποδιδόμενης ισχύος, της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της κατάστασης του συμπιεστή σε επιφανειακό επίπεδο με κάποια επιλεκτικά διαγράμματα να συνοδεύουν το τελικό αποτέλεσμα. Καταγράφεται μονάχα μια μέτρηση κάθε κρίσιμου μεγέθους που είναι απαραίτητο για τη διάγνωση της κατάστασης του κινητήρα (TIT, TORQUE, SFC κ.λπ.) στην οποία συμπεριλαμβάνεται και ο θόρυβος με αποτέλεσμα ο χειριστής να λαμβάνει στην κονσόλα ενδείξεις όπου δεν αντανακλούν την πραγματική τους τιμή αλλά περιέχουν μια απόκλιση. Επιπρόσθετα, κατά τη διαδικασία λήψης των απαιτούμενων μετρήσεων στη θερμοκρασία ενδιαφέροντος (TIT), όπως ακριβώς άλλωστε ορίζεται από την T.O του κινητήρα, είναι αδύνατη η ταυτόχρονη καταγραφή τους με αποτέλεσμα την (έστω και μικρή) αλλαγή των τιμών λόγω της τοπικά μεταβατικής (transient) λειτουργίας του A/K. Έτσι, φαινομενικά όλα τα δεδομένα θα έχουν συλλεχθεί για την ίδια τιμή θερμοκρασίας αλλά ουσιαστικά το κάθε ένα θα αντιστοιχεί σε μια τιμή που αποκλίνει από την πραγματική. Οι αποκλίσεις που αναφέρθηκαν μπορεί να αντιστοιχούν σε ποσοστό του 0.11%, που σε μικροσκοπική ανάλυση και κατά γενική περίπτωση ορθά μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο, μακροσκοπικά ωστόσο και δεδομένου ότι όλες οι εξαχθείσες τιμές χρησιμοποιούνται μετέπειτα στις επιβαλλόμενες διορθωτικές εξισώσεις, ο αλληλένδετος και αναπόφευκτος συνδυασμός όλων αυτών των κατά τα άλλα μικρών σφαλμάτων θα οδηγήσει σε ένα γενικευμένο σφάλμα (snow ball effect) με αρνητικές συνέπειες στο τελικό αποτέλεσμα.

Ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί, πως με τη χρήση εξειδικευμένων διατάξεων, υπάρχει πλέον το προνόμιο της ταυτόχρονης καταγραφής των τιμών όλων των παραμέτρων ενδιαφέροντος. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα λήψης πολλαπλών μετρήσεων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (υψηλό sampling rate) για κάθε θερμοκρασία ενδιαφέροντος και η εξαγωγή του μέσου όρου των τιμών με σκοπό την

ελαχιστοποίηση του θορύβου, το οποίο και αποτελεί σήμερα βασική πρακτική σε διατάξεις παρακολούθησης υγείας αεριοστροβίλων.

Επιπλέον, ανοίγονται νέοι ορίζοντες, αφού η ψηφιοποίηση δίνει δυνατότητες διατήρησης βάσης δεδομένων των δοκιμών κάθε A/K, τη χρήση λογισμικού ανάλυσης της υγείας των συνιστωσών του καθώς και δυνατότητα πρόγνωσης της κατάστασης της υγείας του.

Με λίγα λόγια, η δουλειά την οποία αναλαμβάνει να εκτελέσει το λογισμικό είναι η διόρθωση όλων των συλλεγμένων τιμών, ο υπολογισμός των απαιτούμενων μεγεθών ανάγοντας τα σε συνθήκες τυπικής μέρας και η παροχή χρήσιμων διαγραμμάτων που προσδιορίζουν την κατάσταση υγείας είτε ολόκληρου του κινητήρα είτε συνιστωσών του. Η εισαγωγή των εξισώσεων διόρθωσης επιδόσεων σε ένα τέτοιο λογισμικό επιτρέπει τον αυτόματο υπολογισμό της κατάστασης του A/K. Συνεπώς, είναι δυνατή η άμεση εξαγωγή των τιμών των μεταβλητών επιδόσεων καθώς και χρήσιμων διαγραμμάτων.

Ταυτοχρόνως, αυτή η διαδικασία θα συμβάλει στη μείωση της πιθανότητας ανθρώπινου λάθους με τη μη σωστή εισαγωγή των τιμών κατά την εκτέλεση του performance, καθότι κάθε απαιτούμενη μέτρηση έχει προβλεφθεί να υπάγεται στα αυστηρά όρια του εύρους τιμών που αναφέρονται στην βιβλιογραφία. Αποτελεί αναμφίβολα μία ζωτικής σημασίας δικλείδα ασφαλείας, γιατί στην περίπτωση πληκτρολόγησης λανθασμένων ενδείξεων, θα εμφανιστούν κατάλληλα μηνύματα στον χρήστη ενημερώνοντάς τον για το είδος του σφάλματος, πως είτε η τιμή είναι εκτός των προβλεπόμενων ορίων είτε έχει εισαχθεί κάποιος μη έγκυρος χαρακτήρας. Το λογισμικό δεν θα επιτρέψει την περαιτέρω αξιοποίηση των πληροφοριών, μέχρι να εξαλειφθεί το οποιοδήποτε σφάλμα. Έτσι, αποφεύγεται η εξαγωγή παραπλανητικών αποτελεσμάτων και γίνεται αποτελεσματική αξιοποίηση χρόνου. Πρέπει να σημειωθεί δε, πως η ευαισθησία των μετρήσεων είναι αρκετά μεγάλη και πως η διαφοροποίηση ακόμα και μιας μονάδας κάποιας κρίσιμης, για το αποτέλεσμα, παραμέτρου, μπορεί να αλλάξει εξ ολοκλήρου το αποτέλεσμα.

4.2. Μετρούμενα Μεγέθη και Διορθώσεις Αυτών

Όπως έχει ήδη καλυφθεί σε προηγούμενη ενότητα, τα απαραίτητα μεγέθη αφορούν τιμές θερμοκρασιών, πιέσεων, ενδείξεων ροπής, ροής αέρα και καυσίμου και πληροφορίες για τυχόν κραδασμούς.

Σε περισσότερη ανάλυση, λαμβάνονται οι τιμές της ροπής τόσο αριθμητικά (RPM) όσο και ποσοστιαία (%), της ροής καυσίμου (p_{rh}), της πίεσης στην είσοδο του συμπιεστή ή αλλιώς γνωστή ως P_{t2} ή CIP (in Hg). Της θερμοκρασίας εισόδου του συμπιεστή CIT, της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στον στρόβιλο Tt4 ή TIT (°C), της πίεσης αναφοράς του Δοκιμαστηρίου, P_{s7} ή TCRP. Μετρώνται ακόμα η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα ή ambient (°C), η πίεση στην εισαγωγή καυσίμου ή Fuel Inlet Pressure (psig), η πίεση ελαίου στο power section (psig), η θερμοκρασία εισόδου ελαίου (°C), η πίεση στο RGB (psig). Επιπλέον λαμβάνονται δεδομένα για την

differential sump pressure η οποία αναφέρεται στην διαφορά πίεσης μεταξύ δύο σημείων εντός της δεξαμενής ελαίου (in Hg), για την πίεση εξαγωγής συμπιεσμένου αέρα από το τμήμα του συμπιεστή αλλιώς Compressor Discharge Pressure (CDP), για την πίεση επιστροφής του λαδιού στο κιβώτιο ταχυτήτων (psig) και στο power section (psig) και τέλος οι τιμές της θερμοκρασίας εξόδου του λαδιού τόσο από το RGB (°C) όσο και από το power section (°C). Σημαντικές είναι και οι ενδείξεις που λαμβάνονται για τους κραδασμούς που ενδέχεται να παρουσιάζει ο κινητήρας.

Όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη αφορούν τιμές observed οι οποίες μετέπειτα θα φιλτραριστούν από τις εξισώσεις, ώστε να αποδοθούν οι πραγματικές και διορθωμένες μετρήσεις. Παράλληλα, εκτός των παραπάνω, έχουν ήδη προσδιοριστεί οι τιμές της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου, του ειδικού βάρους του, όπως επίσης δύναται η παρουσία επιπρόσθετων ειδικών συντελεστών οι οποίοι για παράδειγμα, στοχεύουν στην προσαρμογή των μετρήσεων που λαμβάνουν χώρα στον χώρο δοκιμών, ο οποίος πιθανόν δεν πληροί τις απαιτούμενες συνθήκες, με σκοπό την εξασφάλιση ότι εντέλει όλες οι τελικές τιμές θα είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβείς. Τέτοιοι παράγοντες λαμβάνουν υπόψη τη θερμοκρασία, την πίεση και την υγρασία του περιβάλλοντα αέρα.

Έχοντας εξασφαλίσει τον επιθυμητό όγκο πληροφοριών, σειρά έχει η εφαρμογή των εξισώσεων. Κάθε αριθμός, κάθε τιμή που προκύπτει από την εφαρμογή των εξισώσεων, δεν είναι παρά μόνο η αντανάκλαση των ατμοσφαιρικών συνθηκών και της γενικότερης κατάστασης του κινητήρα. Οποιαδήποτε λανθασμένη διαδικασία, οποιαδήποτε εσφαλμένη μεταχείριση οποιουδήποτε εξαρτήματος, οποιαδήποτε αμέλεια ή κακός χειρισμός οποιασδήποτε συνιστώσας του κινητήρα, θα αποκαλυφθεί στο τελικό στάδιο της δοκιμής. Η αλυσίδα θα σπάσει στον πιο αδύναμο κρίκο της και οποιαδήποτε αστοχία ή παράλειψη θα εκδηλωθεί με την εξαγωγή των τελικών επιδόσεων.

Οι εξισώσεις που εφαρμόζονται στην περίπτωση του ελικοστρόβιλου κινητήρα του Κεφαλαίου 3, δεν χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη πολυπλοκότητα. Τρεις είναι οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται, μια για κάθε ένα μέγεθος εκ των s.f.c., FF και TMHP. Η παράμετρος TMHP (Torquemeter Horsepower) είναι ένα μέτρο μέτρησης της ιπποδύναμης που υπολογίζεται μέσω της ροπής που λαμβάνεται κατά την φάση του Take-off με θερμοκρασία TIT=1077°C. Τα τρία προαναφερθέντα μεγέθη, δεν είναι απευθείας observed τιμές από την κονσόλα, αλλά προκύπτουν από τη συνεργασία όλων όσων έχουν περιγραφεί ανωτέρω.

Όλες οι διορθώσεις λαμβάνουν χώρα στην φάση του Take-off, που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ του κινητήρα ή με άλλα λόγια στην μέγιστη ισχύ που είναι ικανός να παράξει. Είναι απολύτως λογικό, καθότι σε αυτήν την φάση ο κινητήρας καταπονείται περισσότερο, αποδίδοντας τα μέγιστα λόγω του ότι έχει να προσπελάσει τις αντιστάσεις που οφείλονται στην βαρύτητα και στην αεροδυναμική αντίσταση. Άρα ο κινητήρας δοκιμάζεται στο πιο απαιτητικό και δύσκολο έργο του. Μερικές φορές, είτε για λόγους που αφορούν τη γενική εικόνα του κινητήρα, λόγω χάριν φθαρμένα ή καταπονημένα εξαρτήματα, είτε εξαιτίας της επίδρασης δυσμενών καιρικών συνθηκών, είναι αναμενόμενο να μην μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη TIT των 1077°C, αλλά

κάποια μικρότερη τιμή της. Όπως τονίστηκε η θερμοκρασία του Take-off αφορά μια τιμή αναφοράς η οποία έχει επιλεγεί από τον κατασκευαστή με βάσει τα χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές του κινητήρα και βάσει αυτής, πραγματοποιείται η αναγωγή των μετρήσεων σε συνθήκες τυπικής μέρας. Άρα, με κάποιον τρόπο θα πρέπει ακόμα και όταν η πραγματική θερμοκρασία (observed) διαφέρει από την απαιτούμενη της βιβλιογραφίας, να εξάγονται έγκυρα αποτελέσματα. Ο τρόπος με τον οποίο εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των διορθωμένων τιμών, σε αυτή την περίπτωση, είναι η εκτέλεση γραμμικής παρεμβολής σε ένα σύνολο τιμών, για τον υπολογισμό των απαιτούμενων δεδομένων που δεν περιέχονται άμεσα στους αριθμητικούς πίνακες αλλά βρίσκονται εντός του γενικότερου φάσματος τιμών, των δεδομένων που παρέχονται. Το αποτέλεσμα της γραμμικής παρεμβολής θα είναι η εξαγωγή ενδείξεων που αν και προήλθαν από μια διαφορετική εκ των 1077°C τιμή, θα εκπροσωπούν την φάση του Take-off.

Παράλληλα γίνεται χρήση αριθμητικών πινάκων και ποικίλων διαγραμμάτων, με κοινή βάση την αναγωγή κάθε επιμέρους παραμέτρου σε συνθήκες τυπικής μέρας ή καλιμπραρίσματός της σε συνθήκες επιπέδου θάλασσας.

Αφότου έχουν τηρηθεί όλα τα πρωτόκολλα και είναι βέβαιο πως οι μετρηθείσες τιμές χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία και αφότου εισαχθούν στις εξισώσεις, προκύπτουν οι τρεις πολυπόθητες τιμές: CORR TMHP, CORR FF, CORR SFC. Η διορθωμένη τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, δεν είναι τίποτα περισσότερο από το πηλίκο της διορθωμένης ροής καυσίμου (CORR FF) προς την διορθωμένη TMHP (CORR TMHP). Πέραν αυτών, γίνεται ο υπολογισμός και των ποσοστιαίων αποκλίσεών τους.

$$\% \text{ TMHP Variation} = \frac{\text{CORR TMHP} - \text{MIN TMHP}}{\text{MIN TMHP}} \times 100$$

$$\% \text{ SFC Variation} = \frac{\text{CORR SFC} - \text{MAX SFC}}{\text{MAX SFC}} \times 100$$

Η πρώτη εξίσωση υπολογίζει τη μεταβολή της διορθωμένης TMHP σε σχέση με την ελάχιστη τιμή της, ενώ στην δεύτερη υπολογίζεται η μεταβολή του διορθωμένου SFC σε σχέση με τη μέγιστη τιμή του SFC. Αυτός ο υπολογισμός θα οδηγήσει στην κατασκευή ενός πολύ χρήσιμου διαγράμματος που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στον στρόβιλο (TIT) και των δύο προηγούμενων υπολογισθέντων ποσοστιαίων μεταβολών, σχηματίζοντας έτσι δυο χαρακτηριστικά ευθύγραμμα τμήματα που αποτελούν τον γεωμετρικό τόπο, όλων των σημείων που αφορούν τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές της διορθωμένης ειδικής κατανάλωσης και των ελαχίστων τιμών της διορθωμένης ιπποδύναμης.

Ωστόσο, οποιαδήποτε θετική ή αρνητική επίδραση, είτε μεμονωμένα, είτε σε συνδυασμό στις τελικές αποδόσεις του A/K, θα πραγματευτεί με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 5.

4.3. Ανάπτυξη Λογισμικού Υπολογισμού Επιδόσεων

Θεωρητικά, η δουλειά την οποία κατασκευάστηκε να εκτελεί το λογισμικό μπορεί να αποτυπωθεί σε μερικές μόνο γραμμές. Δέχεται τις εξαχθείσες από τη δοκιμή τιμές, αξιοποιεί τις διορθωτικές εξισώσεις που υπαγορεύονται από τη βιβλιογραφία, τις εφαρμόζει και εξάγει τα ζητούμενα αποτελέσματα.

Στην πράξη, ωστόσο, δεν είναι τόσο απλό. Πρέπει να ληφθούν υπόψη ποικίλοι παράγοντες, να ενσωματωθούν ουσιώδη αριθμητικοί πίνακες και διαγράμματα από τα οποία το πρόγραμμα θα επιλέγει τις σωστές τιμές και θα εκτελεί σωστά τις όποιες αντιστοιχήσεις, να ληφθούν σοβαρά υπόψη και να εφαρμοστούν με αυστηρότητα τα επιτρεπόμενα εύρη όλων των συμμετεχόντων παραμέτρων, να συμπεριληφθούν οι διορθωτικές εξισώσεις, να εφαρμοστούν οι κατάλληλοι μαθηματικοί μέθοδοι, να παραχθούν τα τελικά αποτελέσματα και τα ζητούμενα διαγράμματα, να συγκριθούν και να πιστοποιηθούν με το υπάρχον σύστημα υπολογισμού και αξιολόγησης επιδόσεων και τέλος όλα τα παραπάνω να συνταχθούν με τις ιδιαιτερότητες και τους κανόνες που χαρακτηρίζουν την επιλεγμένη γλώσσα προγραμματισμού.

Πρώτο βήμα ήταν το χτίσιμο τριών ξεχωριστών κωδίκων για τους τρεις τύπους της οικογένειας Allison T56, με σκοπό να εξάγουν το performance του καθενός ξεχωριστά. Φέρνοντας εις πέρας αυτόν τον στόχο, υπήρξε μια πρώτη επαφή με το προγραμματιστικό περιβάλλον, κατανοήθηκε η πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τη σχέση όλων των μεγεθών που συμμετέχουν στις διορθώσεις και ακονίστηκαν οι προγραμματιστικές δεξιότητες.

Το περιβάλλον όμως ενός κώδικα δεν είναι φιλικό προς τον χρήστη. Δεν θα πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι το προσωπικό που επωμίζεται να φέρει εις πέρας την δοκιμή, υπάρχει περίπτωση να μη διαθέτει την απαιτούμενη εξοικείωση με μια γλώσσα προγραμματισμού. Πέραν τούτου, η λήψη των μετρήσεων και η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα όπως και η αξιολόγησή τους θα πρέπει να πραγματοποιηθούν εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος. Συνεπώς, καθίσταται σαφής η επιτακτική ανάγκη για τη δημιουργία μιας εφαρμογής, πολύ πιο απλής στη χρήση της, που θα μπορέσει να αποδώσει άμεσα αποτελέσματα, με τη χρήση ενός κουμπιού.

Προχωρώντας τη μελέτη περισσότερο και κάνοντας χρήση του εργαλείου App Designer του MATLAB, επιτυγχάνεται η πολυπόθητη αναβάθμιση της ανάλυσης. Πέραν της διευκόλυνσης του χρήστη, διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό ο ίδιος ο σχεδιαστής της εφαρμογής εξαιτίας της ύπαρξης πλειάδας σχεδιαστικών πακέτων. Παρέχονται στοιχεία UI (User Interface) όπως κουμπιά, πλαίσια, γραφήματα, πίνακες, ραδιοκουμπιά κ.λπ. χωρίς να χρειάζεται η συγγραφή κάποιου κώδικα, παρά μόνο η εισαγωγή των επιθυμητών εντολών στον ήδη έτοιμο κώδικα. Παρέχεται επιπλέον η δυνατότητα drag and drop πολλών στοιχείων διεπαφής που πέραν της εξυπηρέτησης που προσφέρουν στον σχεδιαστή καθότι μειώνεται η δυσκολία σύνταξης των εντολών, εξυπηρετούν τη δημιουργία ενός πρακτικού γραφικού περιβάλλοντος.

4.3.1. Ανάπτυξη Κωδίκων για τους Τρεις Τύπους της Σειράς Allison T56

Σε πρώτο βήμα, αποφασίστηκε να κατασκευαστούν τρεις κώδικες, ένας για κάθε τύπο: T56-A-15 (Series IV), T56-A-14 (Series IV) και T56-A-7B (Series II).

Η λογική πίσω από την αφετηρία του κάθε κώδικα ήταν η δημιουργία ξεχωριστών πινάκων πολύ μεγάλου μεγέθους, έναν για κάθε observed μεταβλητή, το μέγεθος των οποίων θα είναι ίσο με τον αριθμό των μετρήσεων που θα δεχτεί η TIT ή με απλά λόγια ανάλογα με το πόσες φορές θα μετρηθεί η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο.

Στην αρχή κάθε κώδικα ορίζεται ένας μηδενικός, προσωρινά, πίνακας που θα δεχτεί την πρώτη μέτρηση της TIT, TEMPERATURES1, μεγέθους size=zeros(1,nel). Το nel τέθηκε ίσο με μια πολύ μεγάλη τιμή, στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε το 10,000, εξασφαλίζοντας έτσι πως θα υπάρχει επαρκής χώρος στον πίνακα σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να συλλέξει περισσότερες τιμές της TIT από αυτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, χωρίς να υπάρχει περιορισμός χώρου.

Έπειτα ορίζονται οι υπόλοιποι μηδενικοί προσωρινά, απαιτούμενοι πίνακες με μέγεθος ίσο με το μήκος/length του TEMPERATURES1, κάθε ένας από τους οποίους θα αντιπροσωπεύει τις μετρήσεις που συλλέγονται στο στάδιο της δοκιμής. Ακολουθώντας αυτήν την τακτική, κάθε πίνακας, είναι αλληλένδετος με το μέγεθος του δείγματος των θερμοκρασιών TIT.

Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στο τμήμα του κώδικα που απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα:

```
% _____OBSERVED INPUT & DATA_____
%-----
% TIT=TURBINE INLET TEMPERATURE (DEGREES CELCIUS)
TEMPERATURES1=zeros(1,nel);
%
PT2_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%
PS7_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%
CIT_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%
CDP_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%
TORQUE_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%
FUEL_TEMP_TF_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%8
OBS_FF_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%
LAB_SG_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%
FUEL_TEMP_TF_LAB_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%
FUEL_LHV_A=zeros(1,length(TEMPERATURES1));
%
```

Σχήμα 4.1. Τμήμα του κώδικα για την δημιουργία των αρχικών πινάκων όλων των μεταβλητών ενδιαφέροντος

Ξεκινώντας το τρέξιμο του κώδικα, ζητείται από τον χρήστη να εισάγει την πρώτη τιμή της TIT. Εφόσον, συμπληρωθεί η απαιτούμενη τιμή, θα αποθηκευτεί στην θέση Temperatures(1,1) αφήνοντας μηδενικές όλες τις άλλες θέσεις του πίνακα. Στη συνέχεια ο κώδικας απαιτεί την εισαγωγή τιμών για κάθε μεταβλητή που ουσιαστικά αφορά το κάθε είδος μέτρησης που λαμβάνεται στην διάρκεια του performance, αποθηκευόντάς την, στην πρώτη θέση του αντίστοιχου πίνακα της. Με αυτόν τον τρόπο έχει δημιουργηθεί το πρώτο σετ πινάκων με τις πρώτες τιμές μέτρησης κάθε μεταβλητής, για την πρώτη ένδειξη της TIT.

```

while true
    TIT=input('ENTER THE DESIRABLE VALUE OF THE TIT: ','s');
    TIT=strrep(TIT,',','.');
    TIT=str2double(TIT);
    if isnan(TIT)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, TIT CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    %
    elseif TIT>1090 || TIT<=0
        disp('ERROR: THE VALUE OF TIT IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    else
        while true
            %
            if TIT==[REDACTED]
                disp([REDACTED] & ' 75% NORMAL AT 13820 RPM');
            elseif TIT==1010
                disp('TIT=1010°C & 90% NORMAL AT 13820 RPM');
            elseif TIT==[REDACTED]
                disp([REDACTED] & ' MILITARY AT 13820 RPM');
            elseif TIT==1077
                disp('TIT=1077°C & TAKE-OFF AT 13820 RPM');
            end
            %
        end
    end
end

```

Σχήμα 4.2. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής της μεταβλητής TIT

Στην εικόνα 4.2 διακρίνεται το τμήμα του κώδικα που ζητά από τον χρήστη να εισάγει την πρώτη τιμή της TIT. Για λόγους ασφαλείας, οι τιμές της θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στο 75% της ονομαστικής ισχύς και της φάσης του Military, έχουν καλυφθεί. Ακολουθούν εικόνες που αποτυπώνουν τον σχηματισμό των προαναφερθέντων πινάκων.

Όπου κρίνεται σκόπιμο, έχουν καλυφθεί κρίσιμες τιμές για λόγους που άπτονται σε θέματα απορρήτου.

```

%
while true
    PT2=input('Give the value for PT2 in inHg: ','s');
    PT2=strrep(PT2,',','.');
    PT2=str2double(PT2);
    if isnan(PT2)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, PT2 CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif PT2<[ ] || PT2>[ ]
        disp('ERROR: THE VALUE OF PT2 IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    PT2_A(1,1)=PT2;
    break
end
%
while true
    PS7=input('Give the value for PS7 in inHg: ','s');
    PS7=strrep(PS7,',','.');
    PS7=str2double(PS7);
    if isnan(PS7)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, PS7 CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif PS7<[ ] || PS7>[ ]
        disp('ERROR: THE VALUE OF PS7 IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    PS7_A(1,1)=PS7;
    break
end
%

```

Σχήμα 4.3. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής των Pt₂ και Ps₇

```

%
while true
    CIT=input('Give the value for CIT in °C: ','s');
    CIT=strrep(CIT,',','.');
    CIT=str2double(CIT);
    if isnan(CIT)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, CIT CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif CIT<[ ] || CIT>[ ]
        disp('ERROR: THE VALUE OF CIT IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    CIT_A(1,1)=CIT;
    break
end
%
while true
    CDP=input('Give the value for CDP in psig: ','s');
    CDP=strrep(CDP,',','.');
    CDP=str2double(CDP);
    if isnan(CDP)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, CDP CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif CDP<[ ] || CDP>[ ]
        disp('ERROR: THE VALUE OF CDP IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    CDP_A(1,1)=CDP;
    break
end

```

Σχήμα 4.4. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής των CIT και CDP.

```

--
while true
    TORQUE=input('Give the value for TORQUE in lbs: ','s');
    TORQUE=strrep(TORQUE,',','.');
    TORQUE=str2double(TORQUE);
    if isnan(TORQUE)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, TORQUE CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif TORQUE<[redacted] || TORQUE>[redacted]
        disp('ERROR: THE VALUE OF TORQUE IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    TORQUE_A(1,1)=TORQUE;
    break
end
%
while true
    FUEL_TEMP_TF=input('Give the value for Fuel Temp TF in °C: ','s');
    FUEL_TEMP_TF=strrep(FUEL_TEMP_TF,',','.');
    FUEL_TEMP_TF=str2double(FUEL_TEMP_TF);
    if isnan(FUEL_TEMP_TF)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, FUEL TEMP TF CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif FUEL_TEMP_TF<[redacted] || FUEL_TEMP_TF>[redacted]
        disp('ERROR: THE VALUE OF FUEL TEMP TF IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    FUEL_TEMP_TF_A(1,1)=FUEL_TEMP_TF;
    break
end
%

```

Σχήμα 4.5. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής των Torque και Fuel Temp TF

```

while true
    OBS_FF=input('Give the value for OBS FF in lbs/hr: ','s');
    OBS_FF=strrep(OBS_FF,',','.');
    OBS_FF=str2double(OBS_FF);
    if isnan(OBS_FF)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, OBS FF CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif OBS_FF<[redacted] || OBS_FF>[redacted]
        disp('ERROR: THE VALUE OF OBS FF IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    OBS_FF_A(1,1)=OBS_FF;
    break
end
%
disp('SPEED WILL REMAIN STABILIZED AT 13820RPM');
%
break
end
TEMPERATURES1(1,1)=TIT;
break
end
end
break
end

```

Σχήμα 4.6. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της πρώτης τιμής του OBS_FF

Μάλιστα στην εικόνα 4.4, διακρίνεται και η εντολή με την οποία τοποθετείται η πρώτη τιμή της TIT, στην πρώτη θέση του δικού της πίνακα.

Στην συνέχεια εμφανίζεται ένα μήνυμα που ρωτάει τον χειριστή αν επιθυμεί να εισάγει ένα νέο σετ μετρήσεων που αντιστοιχούν σε μια καινούρια TIT. Πατώντας YES η διαδικασία συνεχίζει και δημιουργείται ένα καινούριο σετ πινάκων, ακολουθώντας ακριβώς την ίδια λογική με πριν. Η διαφοροποίηση αυτού του βήματος είναι ότι πλέον οι νέες μετρήσεις τοποθετούνται στη θέση που αντιστοιχεί στην σειρά λήψης της TIT και πως πλέον η επαναληπτική εντολή μέσα στην οποία είναι τοποθετημένοι οι πίνακες, διακόπτεται όταν ο χρήστης πληκτρολογήσει NO (εικόνα 4.8), τη στιγμή που θα του ζητήσει το πρόγραμμα να εισάγει ακόμα ένα νέο σετ. Πάλι δημιουργείται ένας πίνακας TEMPERATURES2 για τις νέες τιμές της TIT και πίνακες για όλες τις observed τιμές όπως φαίνεται στην εικόνα 4.7.

```
%  
TEMPERATURES2=zeros(1,nel);  
%  
PT2_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%  
PS7_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%  
CIT_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%  
CDP_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%  
TORQUE_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%  
FUEL_TEMP_TF_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%  
OBS_FF_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%  
LAB_SG_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%  
FUEL_TEMP_TF_LAB_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%  
FUEL_LHV_B=zeros(1,length(TEMPERATURES2));  
%
```

Σχήμα 4.7. Τμήμα του κώδικα για την δημιουργία του επόμενου σετ πινάκων όλων των μεταβλητών ενδιαφέροντος

```

%
for i=2:length(TEMPERATURES2)
ANSWER=input('WOULD YOU LIKE TO ADD ANOTHER VALUE FOR TIT? (yes/no): ', 's');
ANSWER=lower(strtrim(ANSWER));
switch ANSWER
case 'yes'
while true
TIT=input('ENTER THE DESIRABLE VALUE OF THE TIT: ', 's');
TIT=strrep(TIT, ',', '.');
TIT=str2double(TIT);
if isnan(TIT)
disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, TIT CAN BE ONLY A NUMBER');
continue;
%
elseif TIT>1090 || TIT<=0
disp('ERROR: THE VALUE OF TIT IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
continue;
%
else
while true
%
if TIT==█
disp('TIT=█ & 75% NORMAL AT 13820 RPM');
elseif TIT==1010
disp('TIT=1010°C & 90% NORMAL AT 13820 RPM');
elseif TIT==█
disp('TIT=█ & MILITARY AT 13820 RPM');
elseif TIT==1077
disp('TIT=1077°C & TAKE-OFF AT 13820 RPM');
end
%

```

Σχήμα 4.8. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή επόμενων τιμών της μεταβλητής TIT

```

%
while true
PT2=input('Give the value for PT2 in inHg: ', 's');
PT2=strrep(PT2, ',', '.');
PT2=str2double(PT2);
if isnan(PT2)
disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, PT2 CAN BE ONLY A NUMBER');
continue;
elseif PT2<█ || PT2>█
disp('ERROR: THE VALUE OF PT2 IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
continue;
end
break
end
PT2_B(1,i)=PT2;
%
while true
PS7=input('Give the value for PS7 in inHg: ', 's');
PS7=strrep(PS7, ',', '.');
PS7=str2double(PS7);
if isnan(PS7)
disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, PS7 CAN BE ONLY A NUMBER');
continue;
elseif PS7<█ || PS7>█
disp('ERROR: THE VALUE OF PS7 IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
continue;
end
break
end
PS7_B(1,i)=PS7;
%

```

Σχήμα 4.9. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή επόμενων τιμών των P_{t2} και P_{s7}

```

%
while true
    CIT=input('Give the value for CIT in °C: ','s');
    CIT=strrep(CIT,',','.');
    CIT=str2double(CIT);
    if isnan(CIT)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, CIT CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif CIT<█ || CIT>█
        disp('ERROR: THE VALUE OF CIT IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    break
end
CIT_B(1,i)=CIT;
%
while true
    CDP=input('Give the value for CDP in psig: ','s');
    CDP=strrep(CDP,',','.');
    CDP=str2double(CDP);
    if isnan(CDP)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, CDP CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif CDP<█ || CDP>█
        disp('ERROR: THE VALUE OF CDP IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    break
end
CDP_B(1,i)=CDP;

```

Σχήμα 4.10. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή της επόμενων τιμών των CIT και CDP.

```

while true
    TORQUE=input('Give the value for TORQUE in lbs: ','s');
    TORQUE=strrep(TORQUE,',','.');
    TORQUE=str2double(TORQUE);
    if isnan(TORQUE)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, TORQUE CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif TORQUE<█ || TORQUE>█
        disp('ERROR: THE VALUE OF TORQUE IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    break
end
TORQUE_B(1,i)=TORQUE;
%
while true
    FUEL_TEMP_TF=input('Give the value for Fuel Temp TF in °C: ','s');
    FUEL_TEMP_TF=strrep(FUEL_TEMP_TF,',','.');
    FUEL_TEMP_TF=str2double(FUEL_TEMP_TF);
    if isnan(FUEL_TEMP_TF)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, FUEL TEMP TF CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif FUEL_TEMP_TF<█ || FUEL_TEMP_TF>█
        disp('ERROR: THE VALUE OF FUEL TEMP TF IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    break
end
FUEL_TEMP_TF_B(1,i)=FUEL_TEMP_TF;
%

```

Σχήμα 4.11. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή επόμενων τιμών των Torque και Fuel Temp TF

```

while true
    OBS_FF=input('Give the value for OBS FF in lbs/hr: ','s');
    OBS_FF=strrep(OBS_FF,',','.');
    OBS_FF=str2double(OBS_FF);
    if isnan(OBS_FF)
        disp('ERROR: THE ENTERED VALUE IS NOT VALID, OBS FF CAN BE ONLY A NUMBER');
        continue;
    elseif OBS_FF<[ ] || OBS_FF>[ ]
        disp('ERROR: THE VALUE OF OBS FF IS OFF THE ACCEPTABLE LIMITS');
        continue;
    end
    break
end
OBS_FF_B(1,i)=OBS_FF;
%
disp('SPEED WILL REMAIN STABILIZED AT 13820RPM');
break
    end
    %
    TEMPERATURES2(1,i)=TIT;
    break
end
%
end
%
case 'no'
    break
otherwise
    disp('INVALID ANSWER.PLEASE ENTER YES OR NO. ');
end
%
end
%

```

Σχήμα 4.12. Τμήμα του κώδικα για τον τύπο T56-A-15, που αφορά την εισαγωγή επόμενων τιμών του OBS_FF

Στην συνέχεια, οι πίνακες που έχουν δημιουργηθεί παραπάνω, εφόσον έχουν το ίδιο μέγεθος θα προστεθούν και θα αφαιρεθούν από αυτούς τα μηδενικά, δίνοντάς τους με αυτόν τον τρόπο την τελική τους μορφή (εικόνα 4.13).

```

%
%
TEMP_TIT=TEMPERATURES1+TEMPERATURES2;
PT2_FINAL_A=PT2_A+PT2_B;
PS7_FINAL_A=PS7_A+PS7_B;
CIT_FINAL_A=CIT_A+CIT_B;
CDP_FINAL_A=CDP_A+CDP_B;
TORQUE_FINAL_A=TORQUE_A+TORQUE_B;
FUEL_TEMP_TF_FINAL_A=FUEL_TEMP_TF_A+FUEL_TEMP_TF_B;
OBS_FF_FINAL_A=OBS_FF_A+OBS_FF_B;
%
%Remove zeros elements from the matrixes & % Final Matrixes
TEMPERATURES=TEMP_TIT(TEMP_TIT~=0);
TEMPERATURES_F=TEMPERATURES*(9/5)+32;
PT2_FINAL=PT2_FINAL_A(PT2_FINAL_A~=0);
PS7_FINAL=PS7_FINAL_A(PS7_FINAL_A~=0);
CIT_FINAL=CIT_FINAL_A(CIT_FINAL_A~=0);
CIT_FINAL_F=CIT_FINAL*(9/5)+32;
CDP_FINAL=CDP_FINAL_A(CDP_FINAL_A~=0);
TORQUE_FINAL=TORQUE_FINAL_A(TORQUE_FINAL_A~=0);
FUEL_TEMP_TF_FINAL=FUEL_TEMP_TF_FINAL_A(FUEL_TEMP_TF_FINAL_A~=0);
OBS_FF_FINAL=OBS_FF_FINAL_A(OBS_FF_FINAL_A~=0);
SPEED=zeros(1,length(TEMPERATURES));
SPEED(1,1:end)=13820;
%
%
```

Σχήμα 4.13. Τελικοί Πίνακες

Θα ακολουθήσουν κάποιες επιπλέον κινήσεις, με τη δημιουργία ενός πίνακα που αντιπροσωπεύει τις στροφές του κινητήρα με την ονομασία SPEED μεγέθους ίσο με το μήκος του τελικού πίνακα TEMPERATURES και τη δημιουργία πινάκων των μεταβλητών της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου, του ειδικού βάρους του καυσίμου και ακόμα κάποιων επιπλέον παραμέτρων που επιτάσσονται από τη βιβλιογραφία. Οι τιμές αυτές δεν αλλάζουν κατά τη διαδικασία αξιολόγησης της απόδοσης του κινητήρα και δεν υπάρχει λόγος να ορίζονται σε κάθε μέτρηση της TIT. Αρκεί μονάχα μια φορά.

Ολοκληρώνοντας όλα τα παραπάνω βήματα, έχει επιτευχθεί η κατασκευή των απαιτούμενων matrices, ένας για κάθε τιμή ενδιαφέροντος και μάλιστα το μέγεθός τους εξαρτάται αυστηρά από το πόσες φορές θα παρθεί λήψη για τη θερμοκρασία εισόδου αέρα στον στρόβιλο. Οι τεχνικές οδηγίες μπορεί να ορίζουν μονάχα τέσσερις φάσεις θερμοκρασιών TIT, ωστόσο περισσότερες ενδείξεις συνεπάγονται περισσότερη διαθέσιμη προς επεξεργασία πληροφορία. Υπενθυμίζεται πως στην εισαγωγή του κεφαλαίου αναφέρθηκε ο αριθμός 400,000 υποδηλώνοντας τη δυνατότητα μεγέθους δείγματος λήψεων από σύγχρονα λογισμικά. Ο κώδικας συνεχίζει με την ενσωμάτωση

των διορθωτικών εξισώσεων και τη διαδικασία υπολογισμού των τελικών αποτελεσμάτων.

Για λόγους που ακόμα μια φορά σχετίζονται με θέματα απορρήτου, δεν είναι δυνατή η πλήρης παράθεση των τμημάτων αυτών. Ακολουθούν δύο εικόνες στις οποίες διακρίνεται η αλληλεπίδραση του χρήστη με τον κώδικα:

```
ENTER THE DESIRABLE VALUE OF THE TIT: █████
TIT=█████ & 75% NORMAL AT 13820 RPM
Give the value for PT2 in inHg: █████
Give the value for PS7 in inHg: █████
Give the value for CIT in °C: █████
Give the value for CDP in psig: █████
Give the value for TORQUE in lbs: █████
Give the value for Fuel Temp TF in °C: █████
Give the value for OBS FF in lbs/hr: █████
SPEED WILL REMAIN STABILIZED AT 13820RPM
WOULD YOU LIKE TO ADD ANOTHER VALUE FOR TIT? (yes/no): yes
ENTER THE DESIRABLE VALUE OF THE TIT: 1010
TIT=1010°C & 90% NORMAL AT 13820 RPM
Give the value for PT2 in inHg: █████
Give the value for PS7 in inHg: █████
Give the value for CIT in °C: █████
Give the value for CDP in psig: █████
Give the value for TORQUE in lbs: █████
Give the value for Fuel Temp TF in °C: █████
Give the value for OBS FF in lbs/hr: █████
SPEED WILL REMAIN STABILIZED AT 13820RPM
WOULD YOU LIKE TO ADD ANOTHER VALUE FOR TIT? (yes/no): yes
ENTER THE DESIRABLE VALUE OF THE TIT: █████
TIT=█████ & MILITARY AT 13820 RPM
Give the value for PT2 in inHg: █████
Give the value for PS7 in inHg: █████
Give the value for CIT in °C: █████
Give the value for CDP in psig: █████
Give the value for TORQUE in lbs: █████
Give the value for Fuel Temp TF in °C: █████
```

Σχήμα 4.14. Εκτέλεση κώδικα με εισαγωγή δεδομένων στο Command window (a.)

```

Give the value for OBS FF in lbs/hr: ██████
SPEED WILL REMAIN STABILIZED AT 13820RPM
WOULD YOU LIKE TO ADD ANOTHER VALUE FOR TIT? (yes/no): yes
ENTER THE DESIRABLE VALUE OF THE TIT: 1077
TIT=1077°C & TAKE-OFF AT 13820 RPM
Give the value for PT2 in inHg: ██████
Give the value for PS7 in inHg: ██████
Give the value for CIT in °C: ██████
Give the value for CDP in psig: ██████
Give the value for TORQUE in lbs: ██████
Give the value for Fuel Temp TF in °C: ██████
Give the value for OBS FF in lbs/hr: ██████
SPEED WILL REMAIN STABILIZED AT 13820RPM
WOULD YOU LIKE TO ADD ANOTHER VALUE FOR TIT? (yes/no): no
Give the value for LAB SG: ██████
Give the value for FUEL TEMP TF LAB in °C: ██████
Give the value for FUEL LHV in BTU/lb: ██████
Give the value for OAT @900°C in °C: ██████
Give the value for BAROM PRESS @900°C in inHg: ██████
Give the value for BLEED PRESS @900°C in psig: ██████
████████████████████████████████████████████████████████████████████████████████
████████████████████████████████████████████████████████████████████████████████
The engine delivers: ██████ HP
Compressor Status: NORMAL ZONE

```

Σχήμα 4.15. Εκτέλεση κώδικα με εισαγωγή δεδομένων στο Command window (b.)

Είναι προφανές, ότι το περιβάλλον εργασίας δεν ανταποκρίνεται στα πλαίσια μιας δοκιμής κινητήρα σε πραγματικό χρόνο. Οι μετρήσεις θα πρέπει να καταγράφονται γρήγορα και ο χειριστής, που πολλές φορές είναι ένας εκ των Δοκιμαστών, δεν θα χρειάζεται να εντρυφήσει σε καμία προγραμματιστική γλώσσα, σε περίπτωση που υπολείπεται εμπειρίας.

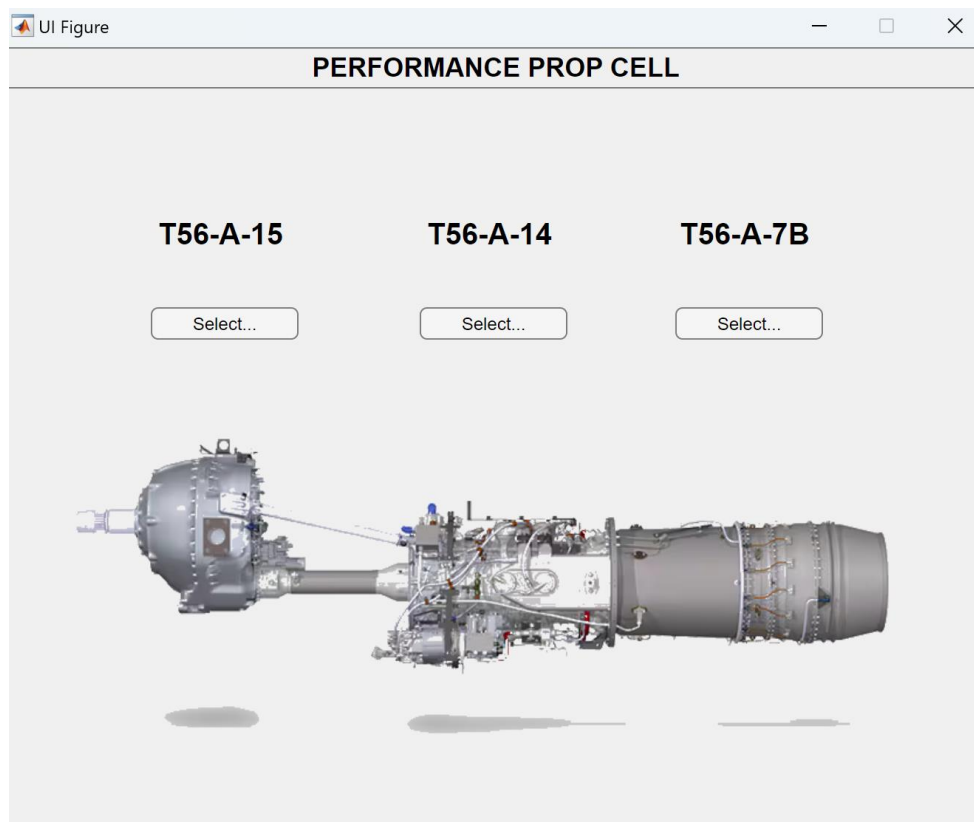
Να επισημανθεί, πως ο αναγραφόμενος κώδικας προσομοιάζει την δοκιμή του μοντέλου T56-A-15. Την ίδια δομή ακολουθούν και οι υπόλοιποι κώδικες για τους T56-A-14 και T56-A-7B. Χάριν οικονομίας χώρου και χρόνου, δεν κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν.

4.3.2. Ανάπτυξη Αλγορίθμου Προσομοίωσης Δοκιμής Κάνοντας Χρήση του App Designer στο Matlab

Τα εμπόδια και τις τεχνικές δυσκολίες που πηγάζουν από τη χρήση του κλασικού κώδικα που προσφέρεται από το Matlab, έρχεται να υπερκεράσει ένα πρόσθετο εργαλείο του, το App Designer.

Η χρήση του συμβάλει στην ανάπτυξη διαδραστικών εφαρμογών με έναν πιο εύχρηστο και οπτικό τρόπο, δίχως την ανάγκη γραφής εκτεταμένου κώδικα. Μειώνει σημαντικά τη δυσκολία συγγραφής και τον χρόνο που απαιτείται για τη δημιουργία και την τροποποίηση εφαρμογών καθώς προσφέρει πληθώρα έτοιμων γραφικών στοιχείων. Αξιοποιώντας όλα τα παραπάνω, έγινε εφικτή η ανάπτυξη μιας εφαρμογής, με ένα πιο φιλικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης. Ο χρήστης θα πρέπει απλώς να συμπληρώσει τα απαιτούμενα πεδία. Σε περίπτωση λάθους εμφανίζονται τα απαραίτητα προειδοποιητικά μηνύματα και η διαδικασία διακόπτεται έως ότου καταχωρηθεί σωστά η ζητούμενη τιμή. Έχοντας τον αναγκαίο όγκο πληροφοριών, το μοναδικό, επόμενο, τελευταίο βήμα είναι το πάτημα ενός κουμπιού ώστε να ξεκινήσει η ανάλυση των δεδομένων για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, μια διαδικασία η οποία διαρκεί μονάχα μερικά δευτερόλεπτα.

Ανοίγοντας την εφαρμογή, στην πάνω πλευρά του αναδύμενου παραθύρου διακρίνεται το όνομά της: PERFORMANCE PROP CELL. Στη μέση είναι τοποθετημένα τρία κουμπιά με αναγραφόμενο το όνομα του κινητήρα για τον οποίο θα διεξαχθεί το performance και φυσικά μια φωτογραφία της σειράς Allison T56 ολοκληρώνει την πρώτη οπτική εμπειρία του χρήστη (εικόνα 4.16).



Σχήμα 4.16. Αρχικό Μενού

Για να ξεκινήσει η χρήση της εφαρμογής, θα πρέπει να επιλεγθεί για ποιόν από τους τρεις τύπους θα διεξαχθεί το επερχόμενο performance. Στην επίδειξη που θα ακολουθήσει, έχει επιλεγθεί ο τύπος A-15. Πατώντας το αντίστοιχο κουμπί *select*, ο χρήστης θα οδηγηθεί σε επόμενο παράθυρο, στο οποίο αυτόματα συμπληρώνεται η ημερομηνία που θα λάβει χώρα η δοκιμή, ενώ παράλληλα θα πρέπει να καταχωρηθούν τα στοιχεία του υπό εξέταση κινητήρα. Απαιτείται το Serial Number που φέρει ο κινητήρας και ο αριθμός W/O, ο οποίος αντιπροσωπεύει όλες τις εργασίες που είναι προγραμματισμένες να γίνουν από τη στιγμή της παραλαβής του μέχρι τη στιγμή που θα είναι έτοιμος να παραδοθεί στον πελάτη. Σε αυτό το στάδιο ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει μεταξύ της διαδικασίας εξαγωγής ολόκληρου του performance ή απλώς της διάγνωσης της υγείας του συμπιεστή. Τέλος, στην κάτω αριστερή πλευρά του παραθύρου πατώντας το κουμπί *back*, το πρόγραμμα επιστρέφει στην αρχική οθόνη.

Date	S/N	W/O
19/10/2024	[REDACTED]	[REDACTED]

Compressor Status... Performance...

back

Σχήμα 4.17. Συμπλήρωση των απαιτούμενων πληροφοριών και επιλογή μελέτης που θα ακολουθηθεί

Επιλέγοντας το κουμπί *Performance*, ακολουθεί ένα τρίτο παράθυρο στο οποίο περιλαμβάνονται οι σταθερές παράμετροι της ανάλυσης, η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του καυσίμου (Fuel LHV), το ειδικό βάρος του (Lab SG), μια τιμή θερμοκρασίας που χαρακτηρίζει το καύσιμο και λαμβάνεται έπειτα από ανάλυση δείγματός του, καθώς και δύο συμπληρωματικοί συντελεστές διόρθωσης. Οι τιμές αυτές παραμένουν αμετάβλητες σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, οπότε η γνωστοποίησή τους στα πρωταρχικά βήματα είναι επαρκής. Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα απομνημόνευσης των τιμών μετά την πρώτη εισαγωγή τους, ώστε να μην

χρειάζεται κάθε φορά η γραφή τους. Θα αλλαχθούν μόνο όταν μεταβληθεί η σύνθεση και η ποιότητα του καυσίμου.

The screenshot shows a window titled 'UI Figure' with a subtitle 'T56-A-15'. Below the subtitle is a tab labeled 'Input Data'. The main area contains a table with the following structure:

Lab SG	Fuel Temp TF Lab	Fuel LHV		

At the bottom of the window, there are two buttons: 'back' on the left and 'next' on the right.

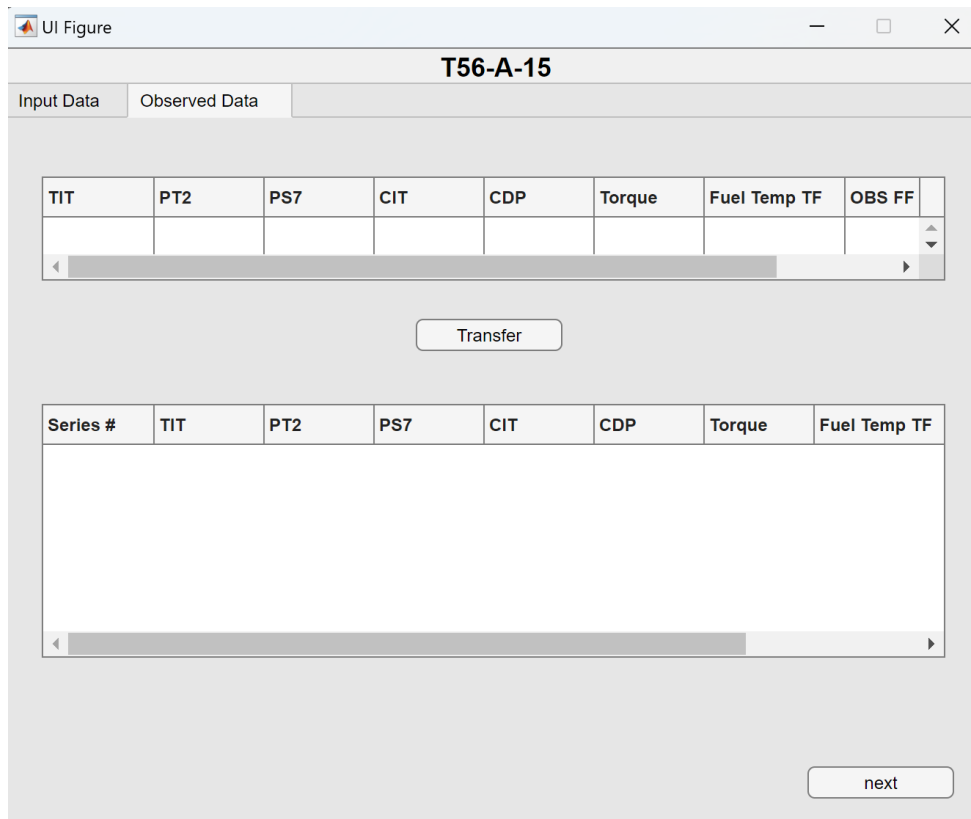
Σχήμα 4.18. Συμπλήρωση των σταθερών παραμέτρων στην αρχή της δοκιμής.

Σειρά έχει η καταγραφή των μετρήσεων για όλες τις τιμές της TIT στις οποίες έχει εκτελεστεί η δοκιμή του κινητήρα. Το παράθυρο μεταφοράς και επεξεργασίας των δεδομένων φαίνεται στην εικόνα 4.19.

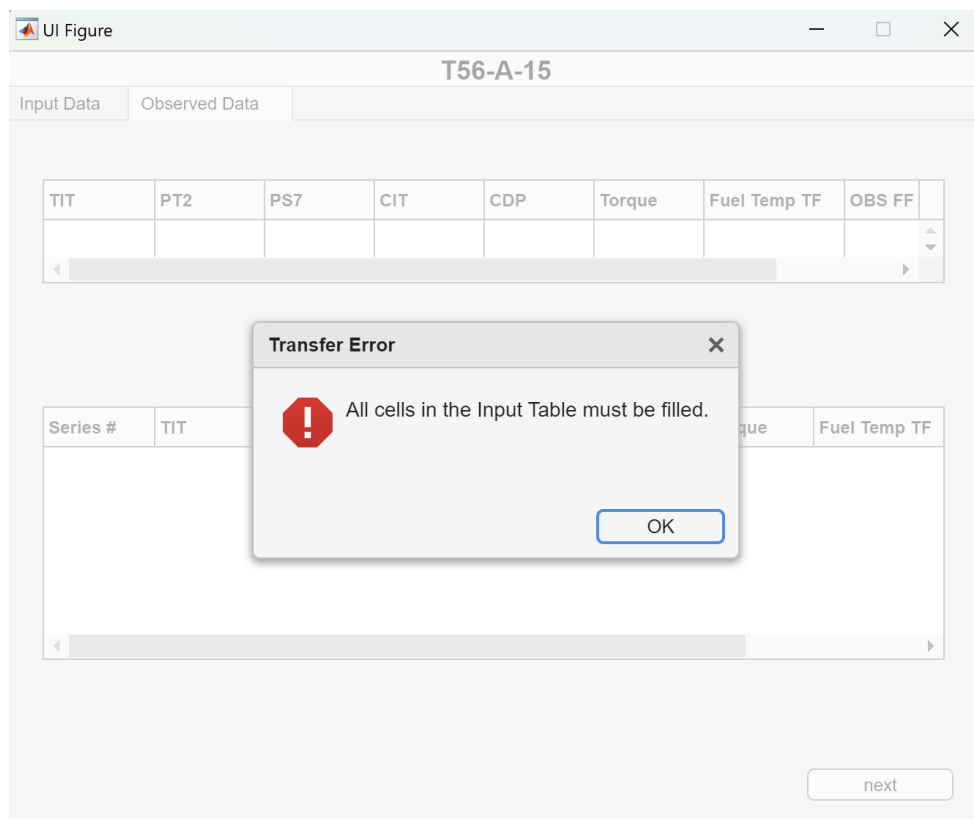
Διαφαίνονται δύο πίνακες. Ο πρώτος (Input Table) έχει προσωρινή μνήμη και σε αυτόν καταγράφονται όλες οι observed τιμές. Πατώντας το κουμπί *Transfer* όλα τα δεδομένα μεταφέρονται στον δεύτερο πίνακα (Cumulative Table), χωρίς πλέον δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας τους, ενώ ο πρώτος καθαρίζεται για νέες καταχωρήσεις. Αφού τελειώσει η εισχώρηση των λήψεων και όλος ο όγκος της πληροφορίας έχει μεταφορτωθεί στον δεύτερο πίνακα, ο χρήστης μπορεί να συνεχίσει με την ανάλυση, πατώντας το *next*.

Για να είναι εφικτό το πέρασμα στο επόμενο στάδιο, θα πρέπει απαραίτητως ο δεύτερος πίνακας να έχει τουλάχιστον ένα σετ μετρήσεων και φυσικά όλες οι δοθείσες τιμές να είναι έγκυρες. Σε αντίθετη περίπτωση, το πρόγραμμα προειδοποιεί τον χρήστη για τον τύπο του σφάλματος και διακόπτει την επεξεργασία έως ότου δεχτεί έγκυρη καταχώρηση.

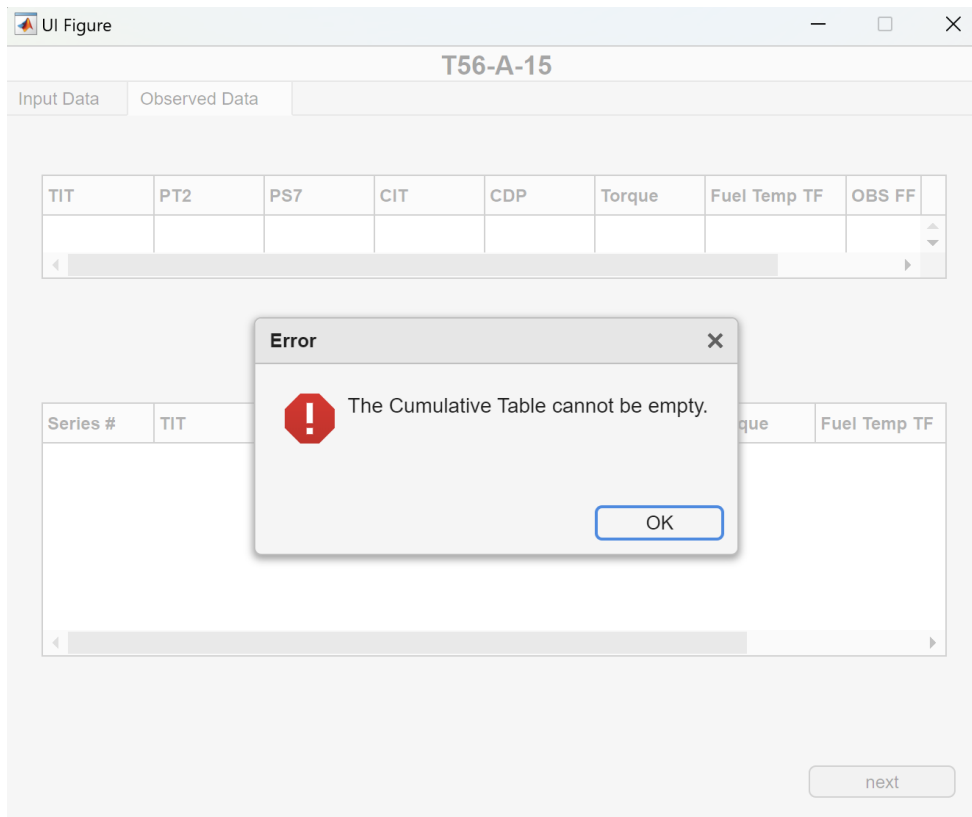
Οι πολλαπλές δικλίδες ασφαλείας που έχουν ενσωματωθεί στον κώδικα, διασφαλίζουν την εγκυρότητα των τελικών διορθωμένων τιμών και παράλληλα επιτυγχάνεται εξοικονόμηση χρόνου αποφεύγοντας τυχόν διερευνήσεις εντοπισμού σφάλματος. Ένας συχνός τύπος λάθους είναι η πληκτρολόγηση τελείας αντί κόμματος ή το ανάποδο. Σε κάποιες χώρες η τελεία χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό των δεκαδικών ψηφίων, σε άλλες συμβαίνει το αντίθετο.



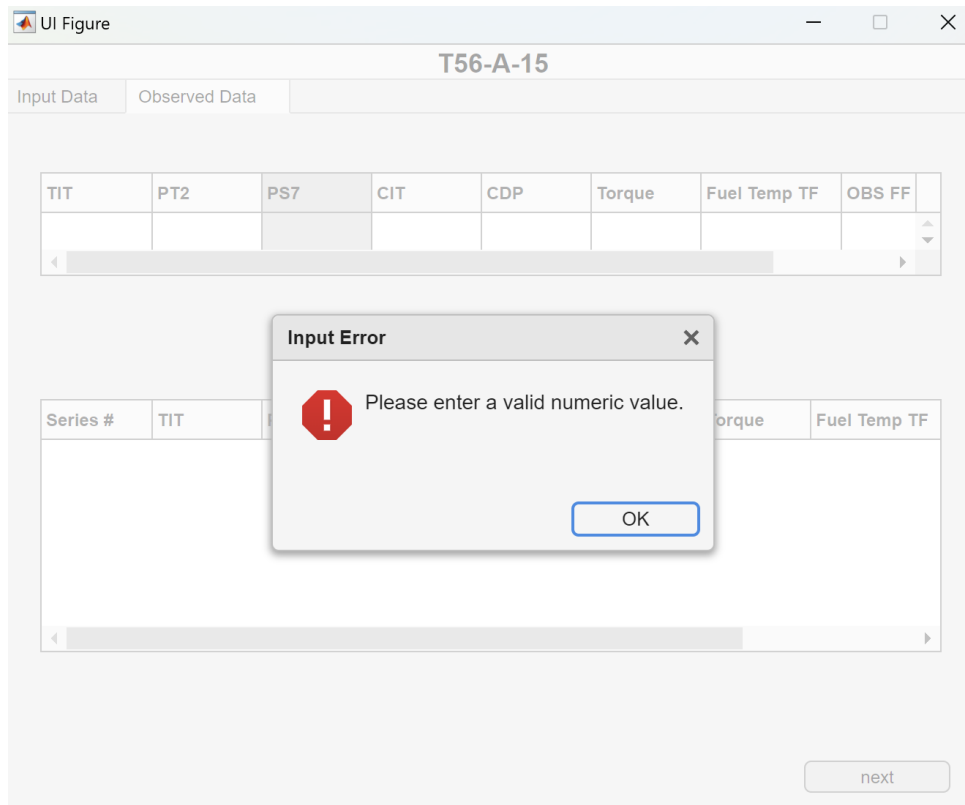
Σχήμα 4.19. Συμπλήρωση των πινάκων



Σχήμα 4.20. Μήνυμα Σφάλματος που ενημερώνει τον χρήστη ότι το κουμπί transfer δεν λειτουργεί αν ο προσωρινός πίνακας είναι άδειος

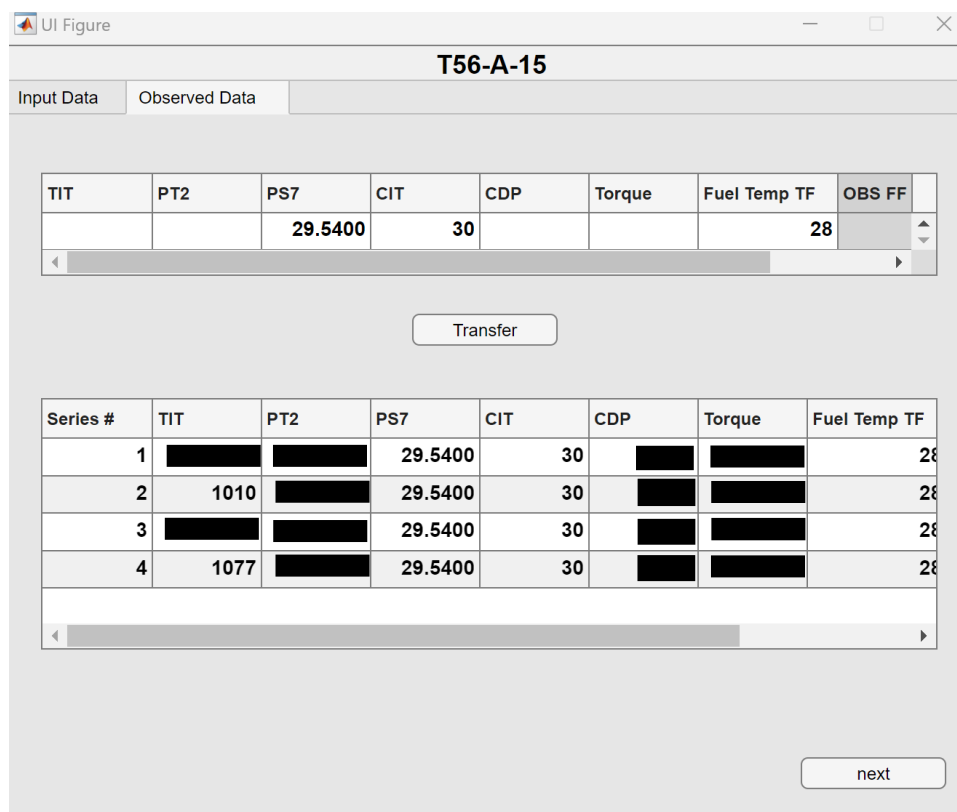


Σχήμα 4.21. Μήνυμα Σφάλματος που ενημερώνει τον χρήστη ότι το ομόνυμο πίνακας δεν μπορεί να είναι άδειος



Σχήμα 4.22. Μήνυμα Σφάλματος που ενημερώνει τον χρήστη για μη έγκυρη καταχώρηση τιμής

Η ολοκληρωμένη μορφή που θα έχει ο δεύτερος πίνακας απεικονίζεται στην εικόνα 4.23 που ακολουθεί:



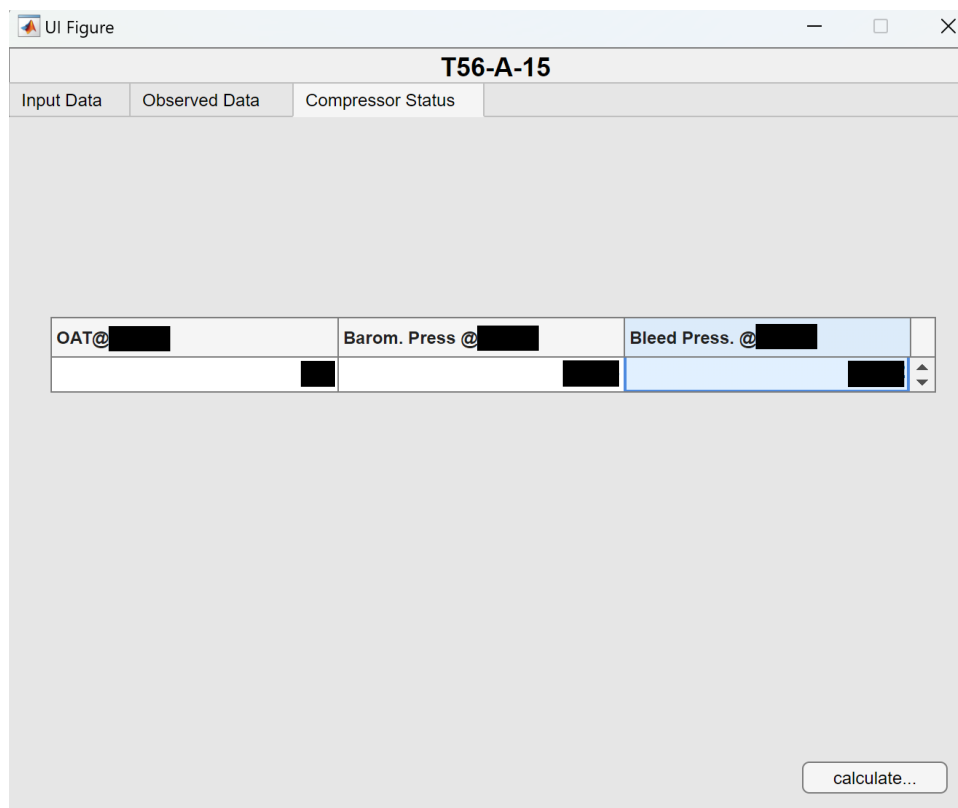
Σχήμα 4.23. Η συμπληρωμένη μορφή του *Cumulative Table*

Ο προσωρινός πίνακας, για λόγους ευκολίας του χρήστη, έχει τη δυνατότητα να συγκρατεί τις τιμές μεταβλητών που παραμένουν αμετάβλητες. Τυχαία συμπληρώθηκαν οι τιμές της Ps7, της CIT και της Fuel Temp TF. Τα νούμερα επιλέχθηκαν για λόγους επεξήγησης του λογισμικού και κανένα από αυτά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Επιλέγοντας το *next*, σειρά έχουν οι τιμές των παραμέτρων που θα αποφανθούν για την υγεία του συμπιεστή. Το συγκεκριμένο βήμα, μπορεί να εκτελεστεί και μεμονωμένα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, παραλείποντας τα βήματα που έχουν περιγραφεί ως τώρα. Αντί για το *performance*, ο χρήστης θα επιλέξει το *Compressor Status*, στο επόμενο κατά σειρά αναδυόμενο παράθυρο μετά την επιλογή τύπου A/K, που θα τον οδηγήσει κατευθείαν στην αναγραφή συγκεκριμένων μετρήσεων πίεσεως σε επιλεγμένη τιμή της TIT βάσει βιβλιογραφίας (εικόνα 4.23). Γίνεται καταγραφή της βαρομετρικής πίεσης (Barom. Press@TIT), της πίεσης εξόδου του συμπιεσμένου αέρα στην έξοδο του συμπιεστή και τέλος της εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα (OAT@TIT).

Κάθε καρτέλα έχει τη δική της μοναδική ονομασία. Η καρτέλα που περιέχει τα στοιχεία του κινητήρα ονομάστηκε Info. Η καρτέλα που περιέχει τις τιμές της θερμογόνου, του ειδικού βάρους, της ειδικής τιμής του ελαίου λίπανσης καθώς και των διορθωτικών συντελεστών φέρει την ονομασία Input Data. Η καρτέλα με τους δύο πίνακες στους οποίους καταχωρούνται οι observed τιμές από τη διαδικασία

αξιολόγησης του κινητήρα ονομάζεται Observed Data ενώ η καρτέλα με τις τιμές για την κατάσταση του συμπιεστή έχει το όνομα Compressor Status.



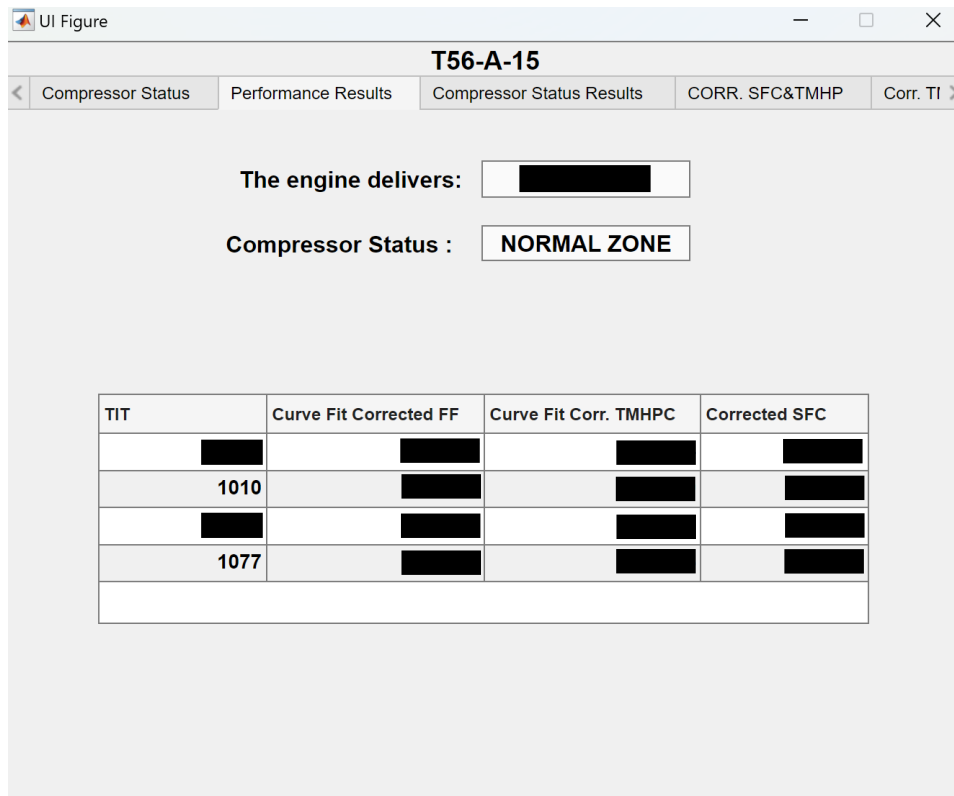
Σχήμα 4.24. Compressor Status

Το μόνο που έχει απομείνει είναι το πάτημα του κουμπιού *Calculate*. Επιλέγοντάς το, σε μερικά δευτερόλεπτα λαμβάνουμε τα πολυαναμενόμενα αποτελέσματα του Performance. Θα εμφανιστούν πέντε νέες καρτέλες με τη σειρά εμφάνισής τους να έχει ως εξής: Performance Results, Compressor Status, CORR SFC&TMHP, Corr TMHP, FF, Corrected SFC, CDP.

Στην καρτέλα Performance Results εμφανίζεται πόσα άλογα συν ή πλην αποδίδει ο A/K σε σχέση με την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του Torquemeter Horsepower στη φάση του Take-off, μια ένδειξη για την υγεία του συμπιεστή και έναν πίνακα με συγκεντρωμένες όλες τις διορθωμένες ενδείξεις των TMHP, FF και s.f.c. σε όλες τις θερμοκρασίες TIT.

Στις καρτέλες Compressor Status, CORR SFC&TMHP, Corr. TMHP, FF, Corrected SFC και CDP απεικονίζονται αναλυτικά διαγράμματα που αφορούν τις παραμέτρους από όπου πήραν τις ονομασίες τους.

Λόγω διαφύλαξης ευαίσθητων πληροφοριών θα παρατεθεί εικόνα μόνο για το παράθυρο που σχετίζεται με τις τιμές του Performance.



Σχήμα 4.25.Καρτέλα Performance Results

Για τους άλλους δύο τύπους, T56-A-14 και T56-A-7B, διατηρείται το ίδιο μοτίβο παραθύρων και αναδυόμενων καρτελών, με τις ίδιες ονομασίες.

Για την αλλαγή τύπου A/K ο χρήστης πηγαίνοντας στην καρτέλα Input Data πατώντας το κουμπί *back*, θα οδηγηθεί στην καρτέλα Info όπου εκεί πατώντας ξανά το κουμπί *back* θα επιστρέψει στην αρχική σελίδα. Εκτελώντας τα παραπάνω βήματα οι όποιες καρτέλες έχουν ανοίξει, αποκρύπτονται, μην επηρεάζοντας το νέο Performance.

Για έξοδο από το πρόγραμμα, αρκεί να πατηθεί το X πάνω δεξιά στην καρτέλα.

4.3.3. Πιστοποίηση Λογισμικού

Για την πιστοποίηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, αρκεί η σύγκριση των τιμών που λαμβάνονται από την χρήση του λογισμικού με τις τιμές που λαμβάνονται από τις υπάρχουσες διαδικασίες της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (ΕΑΒ). Τα δύο σύνολα τιμών, παρατίθενται στον κάτωθι πίνακα:

EAB COMPRESSOR STATUS	SHP	MATLAB COMPRESSOR STATUS	SHP	ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,00%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,29%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,13%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,02%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,00%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,54%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,03%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,01%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,01%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,01%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,01%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,01%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,01%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,02%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,00%
NORMAL ZONE	#####	NORMAL ZONE	#####	0,00%

Πίνακας 4.1 Πιστοποίηση αποτελεσμάτων

Οι όποιες διαφορές προέκυψαν, αναλύθηκαν περαιτέρω και πιστοποιήθηκαν ότι οφείλονται στην διαφορά στρογγυλοποίησης των δύο διαφορετικών διαδικασιών, δηλαδή της υπάρχουσας διαδικασίας που χρησιμοποιείται από την εταιρία και του ανασκευασθέντος λογισμικού.

Κεφάλαιο 5: Επίδραση Μετρούμενων Μεγεθών στον Υπολογισμό Επιδόσεων

Ως παράμετρος καθορίζεται ένας αριθμητικός ή άλλου είδους μετρητικός παράγοντας, που αποτελεί μέρος ενός συνόλου που προσδιορίζει ένα σύστημα ή ένα σύνολο συνθηκών λειτουργίας. Οι παράμετροι είναι στοιχεία που είναι κρίσιμα για την αξιολόγηση της απόδοσης και της γενικότερης κατάστασης του συστήματος που εκπροσωπούν.

Μια παραμετρική ανάλυση, γνωστή αλλιώς και ως ανάλυση ευαισθησίας, είναι η μελέτη της επίδρασης των τιμών των παραμέτρων στη λύση του προβλήματος, η οποία βασίζεται σε σενάρια επίλυσης που καθορίζονται από τον ίδιο τον χρήστη.

Στην παρούσα Εργασία όλα τα δεδομένα που καταγράφονται στην διάρκεια της δοκιμής κατέχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στη διαμόρφωση των τελικών επιδόσεων. Δεδομένα όπως τιμές πίεσης, θερμοκρασίας αλλά και τιμές που αφορούν την ποιότητα και το είδος του καυσίμου συμβάλουν καθοριστικά στη συμπεριφορά του κινητήρα.

Η λανθασμένη εισαγωγή αποτελεσμάτων, είτε σκόπιμη υπηρετώντας λόγους μελέτης, είτε λόγω σφάλματος κάποιου αισθητήρα, δύναται να επηρεάσει τρομακτικά τις τιμές της αποδιδόμενης ώσης ή των αποδιδόμενων αλόγων, ανάλογα με το είδος του αεριοστρόβιλου, της ροής καυσίμου και της ειδικής κατανάλωσής του. Ωστόσο δεν επηρεάζουν όλα τα μεγέθη με τον ίδιο τρόπο το τελικό αποτέλεσμα. Για ορισμένα, η εξάρτησή τους είναι ελάχιστη ή αμελητέα.

Η ανάλυση ευαισθησίας θα λάβει χώρα σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά την αυξομείωση της αρχικής τιμής όλων των παραμέτρων κατά 5% και της αποτύπωσης της μεταβολής τους συναρτήσει των διορθωμένων τιμών των TMHP, του s.f.c. και του FF, όπως αυτές έχουν υπολογιστεί κατά την δοκιμή του A/K T56-A-15 στα Δοκιμαστήρια της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (ΕΑΒ). Αφού εντοπιστούν οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη επιρροή, θα ακολουθήσει το δεύτερο στάδιο στο οποίο θα λάβει χώρα η ταυτόχρονη μεταβολή επιλεγμένων ζευγών και εκ νέου θα παρατηρηθεί η επίδρασή τους στις επιδόσεις του υπό μελέτη κινητήρα.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημανθεί πως η επιβεβλημένη διόρθωση των αποτελεσμάτων, για τον προαναφερθέντα τύπο A/K, βάσει βιβλιογραφίας, επιτυγχάνεται μέσω γραμμικής παρεμβολής. Σε πρώτο στάδιο εξασφαλίζεται μια πρωταρχική διορθωμένη τιμή, είτε των αποδιδόμενων αλόγων (TMHP), είτε της ροής καυσίμου (FF) με τη χρήση γραμμικής παρεμβολής αξιοποιώντας έναν πίνακα τιμών των επικρατουσών θερμοκρασιακών συνθηκών συναρτήσει των τεσσάρων χαρακτηριστικών θερμοκρασιών εισόδου του αέρα στον στρόβιλο (TIT), όπως αυτές καθορίζονται από την τεχνική βιβλιογραφία του κινητήρα.

Έχοντας εξασφαλίσει τις διορθωμένες τιμές, βάσει αυτών θα δημιουργηθεί μια καμπύλη πάνω στην οποία θα γίνει αντιστοίχιση της τιμής της TIT σαν να ήταν 1077°C, ανεξάρτητα αν έχει επιτευχθεί ή όχι αυτό το νούμερο και τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν σε συνεργασία με τις εξισώσεις διόρθωσης, θα παράγουν εντέλει τις πολυπλόχτες διορθωμένες αποδόσεις του αεριοστρόβιλου.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε εγγυάται πως ακόμα κι αν δεν επιτευχθούν οι κρίσιμες θερμοκρασίες αναφοράς και οι τιμές της TIT διαφοροποιούνται από τις προβλεπόμενες, οι επιδόσεις θα έχουν υπολογιστεί για συμπεριφορές που εντέλει θα

έχουν προσαρμοστεί στη συμπεριφορά που θα είχε ο κινητήρας αν όντως η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του στροβίλου άγγιζε τους 1077°C.

Η υλοποίηση των παραπάνω ενεργειών έγινε με την βοήθεια του Microsoft Excel για την αποτύπωση της ποσοστιαίας μεταβολής κάθε παραμέτρου και για τη δημιουργία των απαιτούμενων διδιάστατων διαγραμμάτων. Για τις συνδυασμένες μεταβολές, λόγω του ότι στην ανάλυση υπεισέρχονται πλέον οι τιμές τριών μεταβλητών, ένα 2D διάγραμμα δεν έχει τη δυνατότητα να αποτυπώσει τη σχέση εξάρτησης των εμπλεκόμενων παραμέτρων. Έτσι, προτιμήθηκε η δημιουργία 3D διαγραμμάτων με τη βοήθεια για μια ακόμη φορά, της γλώσσας προγραμματισμού Matlab. Αξιοποιώντας τα εργαλεία που παρέχονται είναι εφικτή η κατασκευή διαγραμμάτων τριών αξόνων και σε συνδυασμό με την ευρεία χρωματική παλέτα, λαμβάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα.

5.1. Παραμετρική ανάλυση μετρούμενων μεγεθών

5.1.1. Πίεση στην είσοδο του συμπιεστή (P_{t2})

Πρώτο μέγεθος της παραμετρικής ανάλυσης, είναι η τιμή της πίεσης στην είσοδο του συμπιεστή ή P_{t2} . Ακολουθεί ενδεικτικός πίνακας με τις ποσοστιαίες συνολικές μεταβολές των P_{t2} , Corrected SHP, Corrected FF και Corrected s.f.c.:

Change in % of P_{t2}	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	436,56%	2,58%	-1,67%
-4,00%	347,10%	2,04%	-1,36%
-3,00%	258,71%	1,52%	-1,03%
-2,00%	171,40%	1,00%	-0,70%
-1,00%	85,16%	0,49%	-0,35%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	-84,30%	-0,49%	0,35%
2,00%	-167,53%	-0,96%	0,72%
3,00%	-249,89%	-1,43%	1,08%
4,00%	-331,40%	-1,88%	1,45%
5,00%	-411,83%	-2,33%	1,82%

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της P_{t2} .

Οι κόκκινες ενδείξεις αντιπροσωπεύουν την αρχική τιμή μέτρησης. Παρατηρώντας τα δεδομένα, αύξηση της P_{t2} συνεπάγεται δραστική μείωση της αποδιδόμενης ισχύς στον άξονα, ενώ μείωσή της συνδέεται με τεράστιες αυξήσεις. Ενδεικτικά, μείωση κατά 5% της αρχικής τιμής της πίεσης εισόδου στο συμπιεστή εκτοξεύει την ισχύ κατά 436.56%, ενώ αύξησή της συνεπάγεται ριζική μείωση κατά 411.83%.

Σε ό,τι αφορά τις μεταβολές της ροής του καυσίμου, διακρίνεται η ίδια συμπεριφορά ωστόσο με μια πολύ πιο ήπια αντίδραση, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ροή του καυσίμου είναι λιγότερο ευαίσθητη σε μεταβολές της P_{t2} .

Στον αντίποδα κινείται η ειδική κατανάλωση καυσίμου παρουσιάζοντας ανάλογη συμπεριφορά με την P_{t2} , με αρνητικές τιμές πίεσης να αντιστοιχούν σε αρνητικές τιμές της ειδικής κατανάλωσης και θετικές τιμές πίεσης να αντικατοπτρίζουν θετικές τιμές s.f.c., χωρίς ωστόσο να εμφανίζονται μεγάλες διακυμάνσεις από την αρχική τιμή.

Αν αναλογιστεί κανείς τους μαθηματικούς τύπους της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και του θερμικού βαθμού απόδοσης, η_{th} , εύκολα γίνεται αντιληπτή η αντιστρόφως ανάλογη σχεσιακή συμπεριφορά τους (Πολυζάκης, 2012).

$$\text{s. f. c.} = \frac{\text{μάζα καυσίμου}}{\text{ωφέλιμο έργο}} = \frac{\text{παροχή μάζας καυσίμου}}{\text{ωφέλιμη ισχύς}}$$

ή

$$\text{s. f. c.} = \frac{\text{fuel flow rate}}{\text{useful power}} = \frac{\text{heat input rate/fuel calorific value}}{\text{useful power}}$$

Ενώ, ο θερμικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ακολούθως:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\text{ωφέλιμο έργο στον άξονα}}{\text{εισαγόμενη θερμότητα}}$$

ή

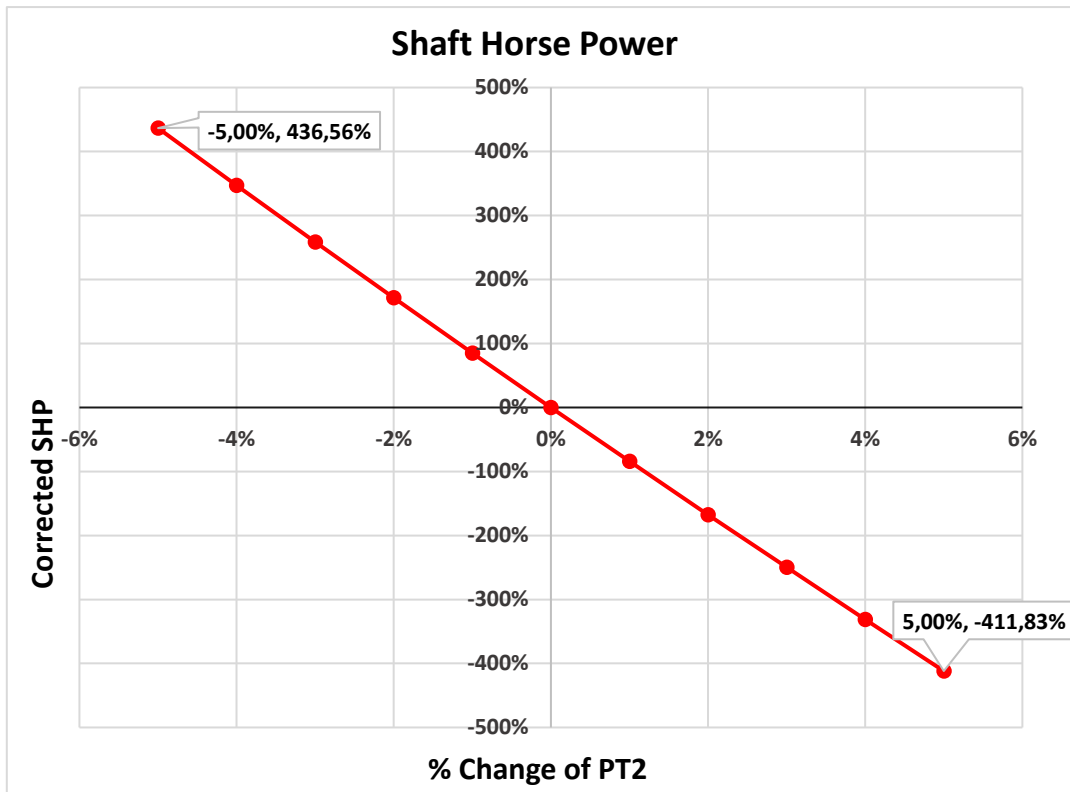
$$\eta_{\text{th}} = \frac{\text{useful shaft work}}{\text{heat input}} = \frac{\text{useful shaft power}}{\text{heat input rate}}$$

Κάνοντας χρήση όλων των παραπάνω προκύπτει μια σχέση η οποία περιλαμβάνει και τα δύο μεγέθη:

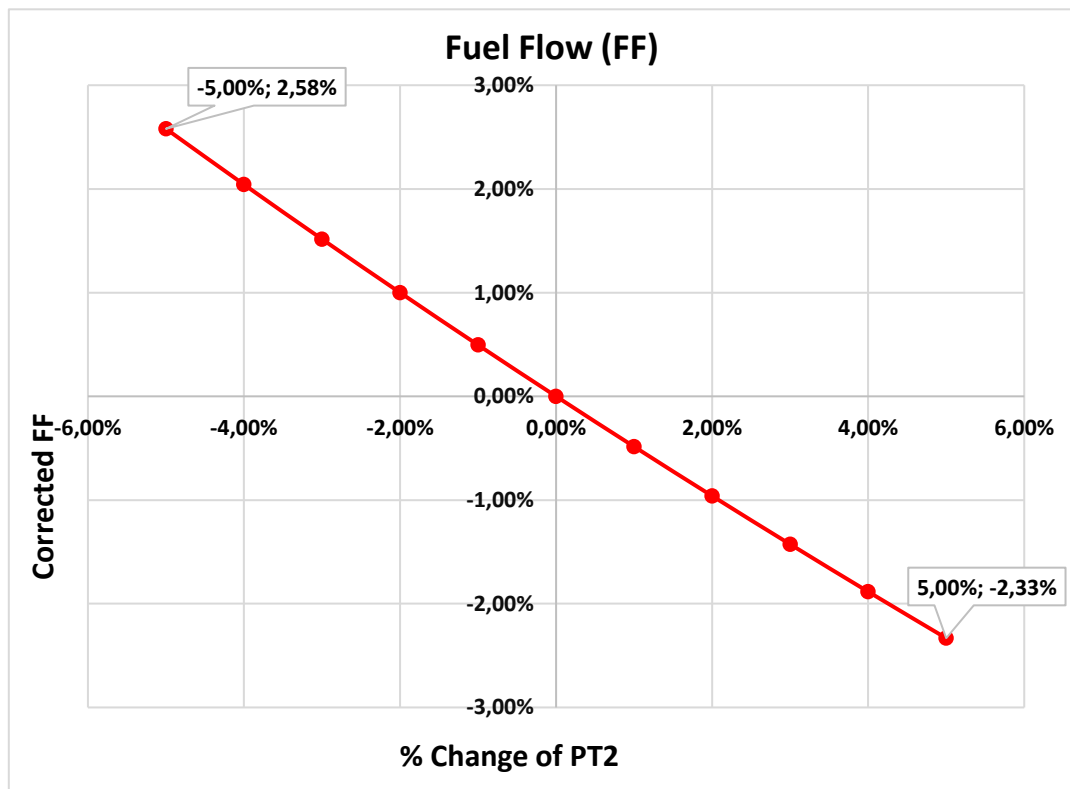
$$\text{s. f. c.} = \frac{1}{\eta_{\text{th}} \cdot \text{fuel calorific value}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{J}} \right)$$

Παρατηρείται λοιπόν πως η ειδική κατανάλωση καυσίμου για δεδομένο καύσιμο, είναι συνάρτηση μόνο της θερμικής απόδοσης και μάλιστα είναι αντιστρόφως ανάλογη αυτής. (Πολυζάκης, 2012). Ο όρος fuel calorific value αναφέρεται στην θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Έτσι λοιπόν, η βελτίωση της αποδιδόμενης ισχύος συμπαρασείρει και τον θερμικό βαθμό απόδοσης και άρα κατά συνέπεια αναμένεται μείωση του s.f.c..

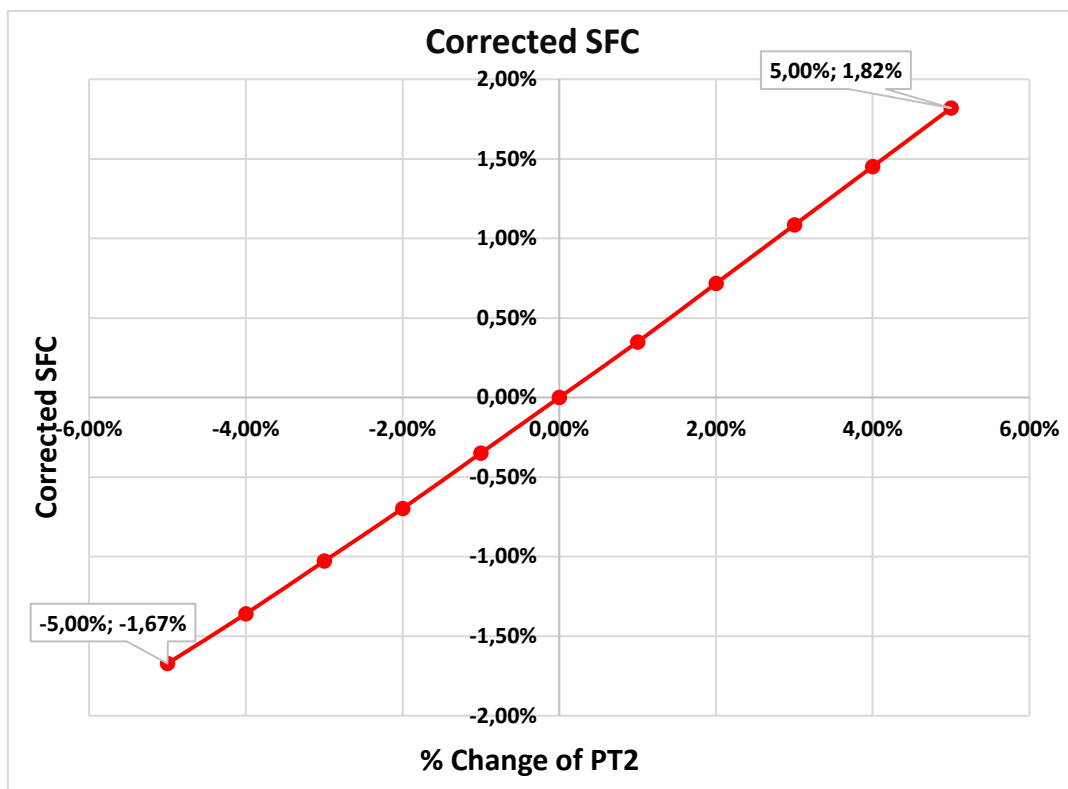
Ακολουθούν αντιπροσωπευτικά διαγράμματα:



Σχήμα 5.1: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της Pt2.



Σχήμα 5.2: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της Pt2.



Σχήμα 5.3: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της Pt2.

5.1.2. Πίεση Αναφοράς Δοκιμαστηρίου (Ps7)

Ακόμα μια σημαντική παράμετρος αποτελεί η πίεση αναφοράς του χώρου που θα εκτελεστεί η δοκιμή του Α.Κ. Η επιρροή της στην τελική του απόδοση παρατηρείται στον από κάτω πίνακα:

Change in % of PS7	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	-388,39%	0,00%	4,01%
-4,00%	-307,53%	0,00%	3,14%
-3,00%	-228,17%	0,00%	2,31%
-2,00%	-150,54%	0,00%	1,51%
-1,00%	-74,62%	0,00%	0,73%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	73,12%	0,00%	-0,72%
2,00%	144,73%	0,00%	-1,41%
3,00%	214,84%	0,00%	-2,09%
4,00%	283,87%	0,00%	-2,74%
5,00%	351,40%	0,00%	-3,36%

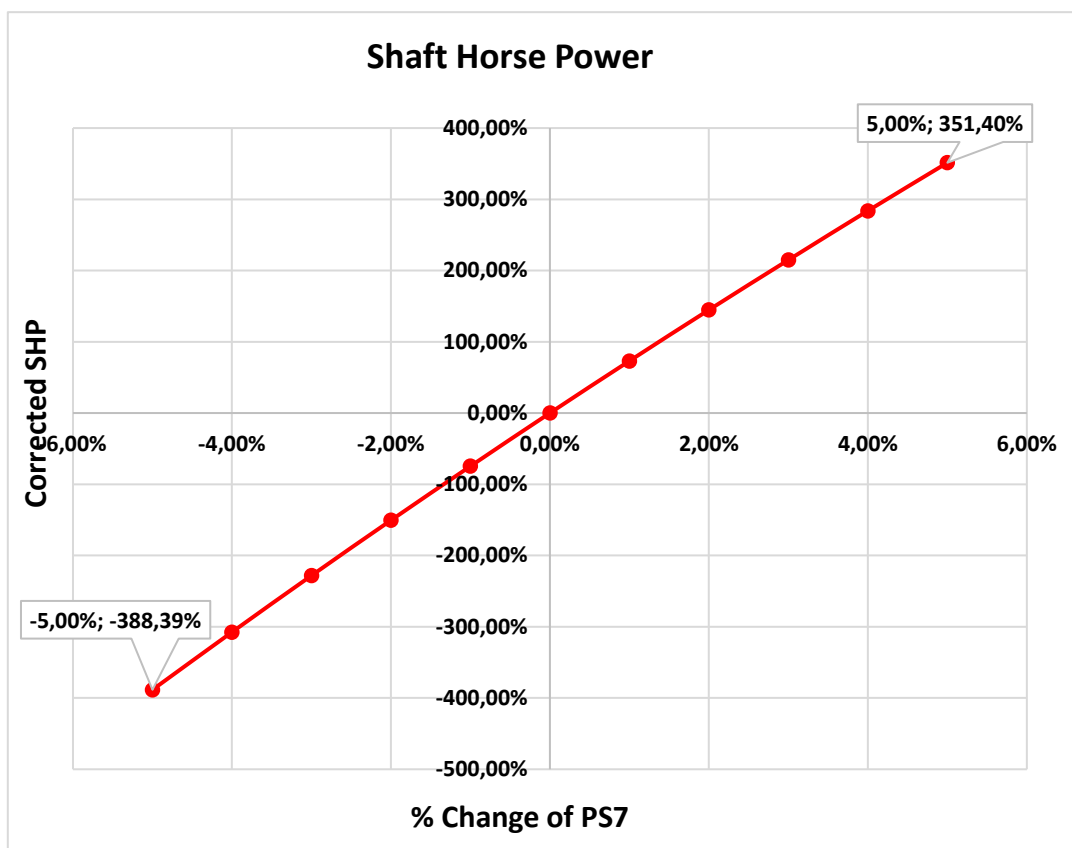
Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της Ps7.

Μεταβολή κατά 5% της αρχικής τιμής προσφέρει τεράστια αύξηση του shp κατά 351.40%, ενώ ποσοστιαία μείωση 5% προσφέρει δραματική μείωση κατά 388.39%.

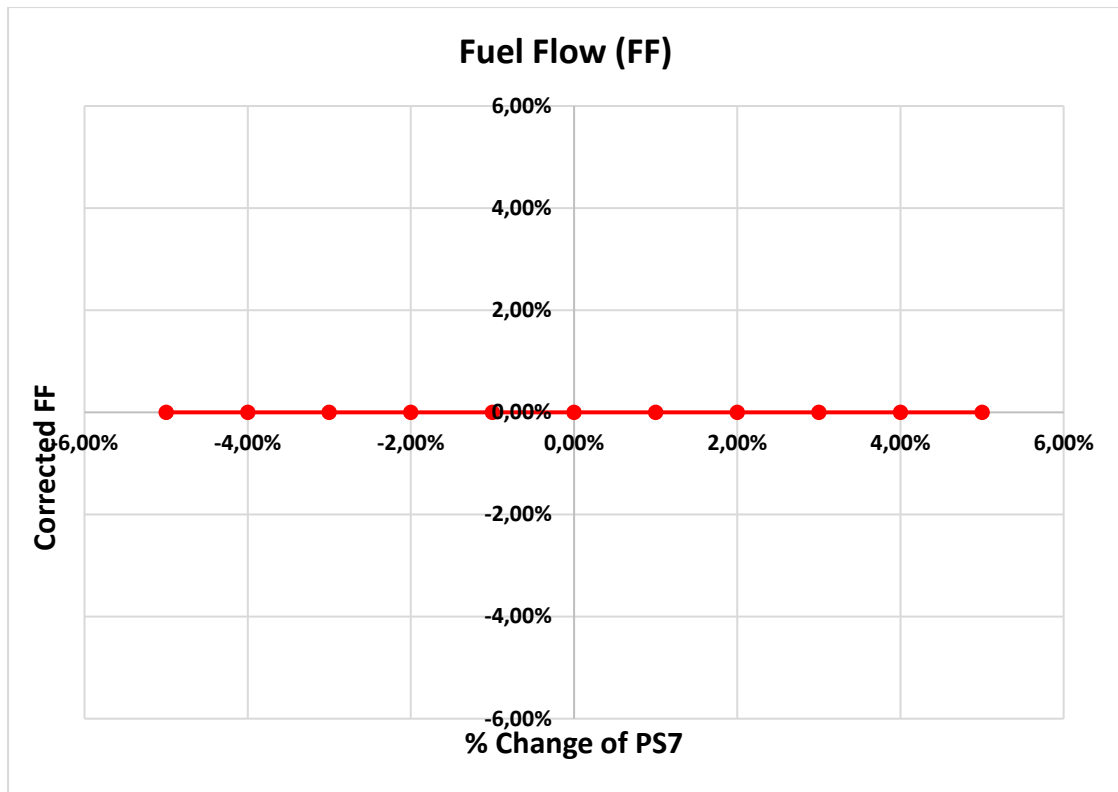
Η ροή καυσίμου δείχνει να μην επηρεάζεται καθόλου σε σχέση με τις προαναφερθείσες μεταβολές.

Ενώ, λόγω της αντιστρόφως ανάλογης εξάρτησης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και αποδιδόμενης ισχύος, παρατηρείται η αναμενόμενη συμπεριφορά. Παρόλα αυτά, δεν διακατέχεται από την ίδια ευαισθησία που χαρακτηρίζει τις τιμές του shp.

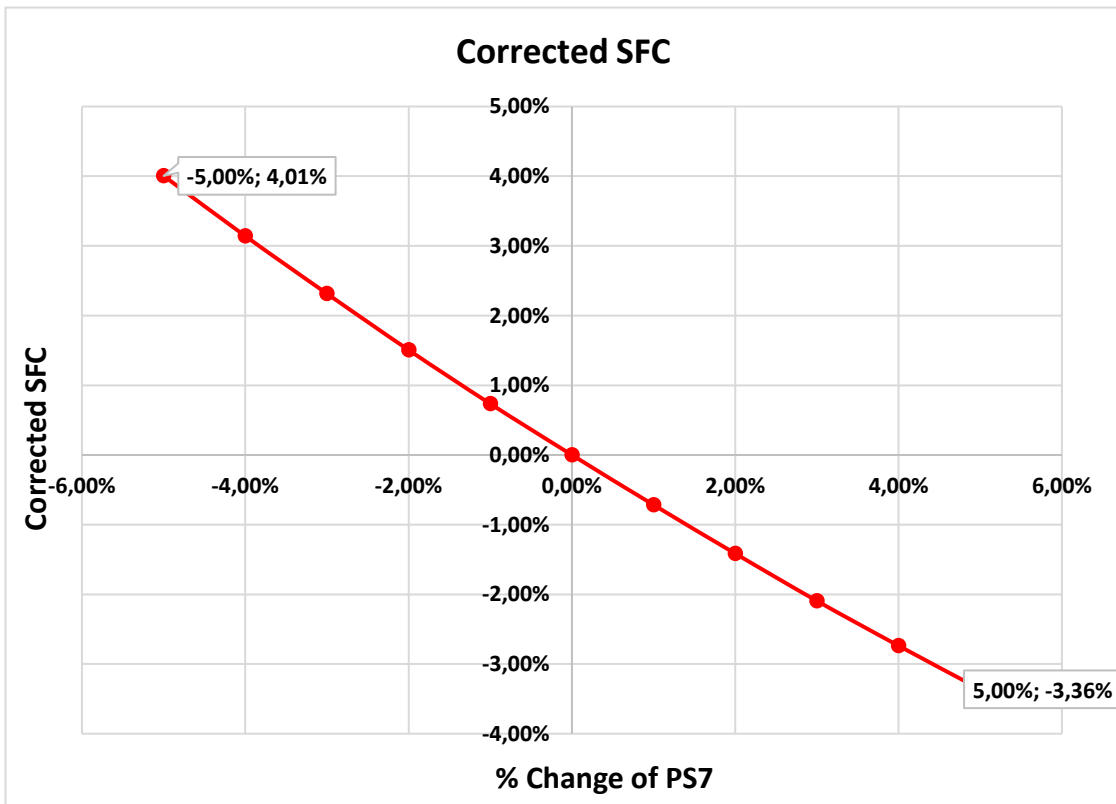
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα:



Σχήμα 5.4: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της Ps7.



Σχήμα 5.5: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της Ps_7 .



Σχήμα 5.6: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της Ps_7 .

5.1.3. Θερμοκρασία Εισερχόμενου Αέρα στον Συμπιεστή (CIT)

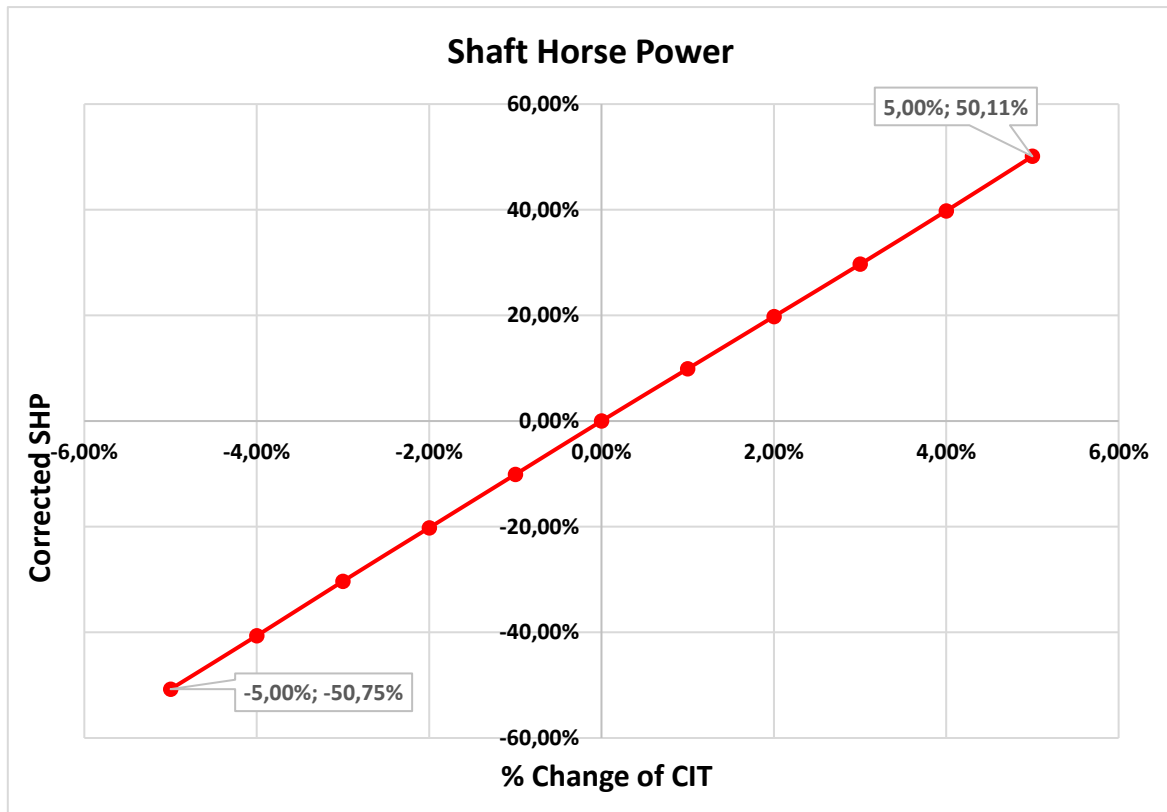
Change in % of CIT	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	-50,75%	-0,41%	0,09%
-4,00%	-40,65%	-0,33%	0,07%
-3,00%	-30,32%	-0,24%	0,06%
-2,00%	-20,22%	-0,16%	0,04%
-1,00%	-10,11%	-0,08%	0,02%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	9,89%	0,08%	-0,01%
2,00%	19,78%	0,16%	-0,02%
3,00%	29,68%	0,23%	-0,03%
4,00%	39,78%	0,31%	-0,03%
5,00%	50,11%	0,39%	-0,04%

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της CIT.

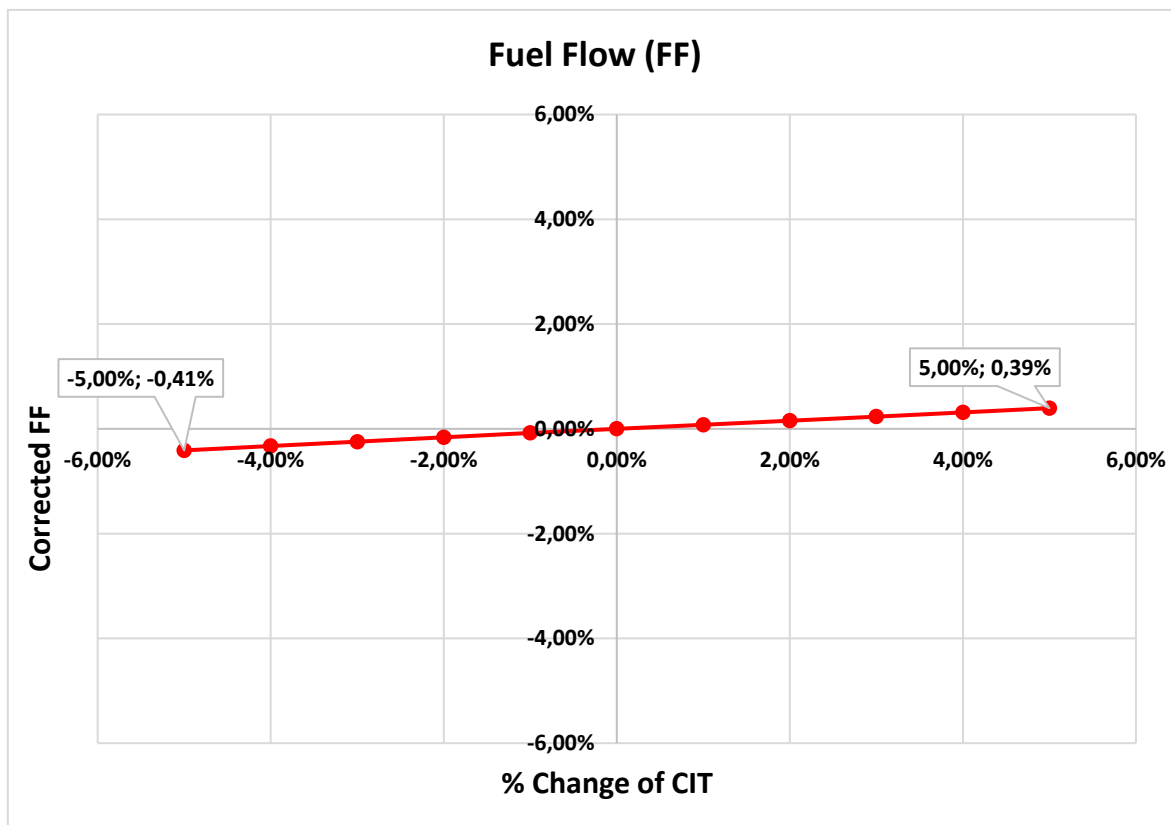
Αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στον στρόβιλο επιφέρει βελτίωση της διορθωμένης τιμής του SHP.

Λιγότερη ευαισθησία παρουσιάζει η ροή του καυσίμου με ελάχιστες διαφοροποιήσεις από την αρχική τιμή.

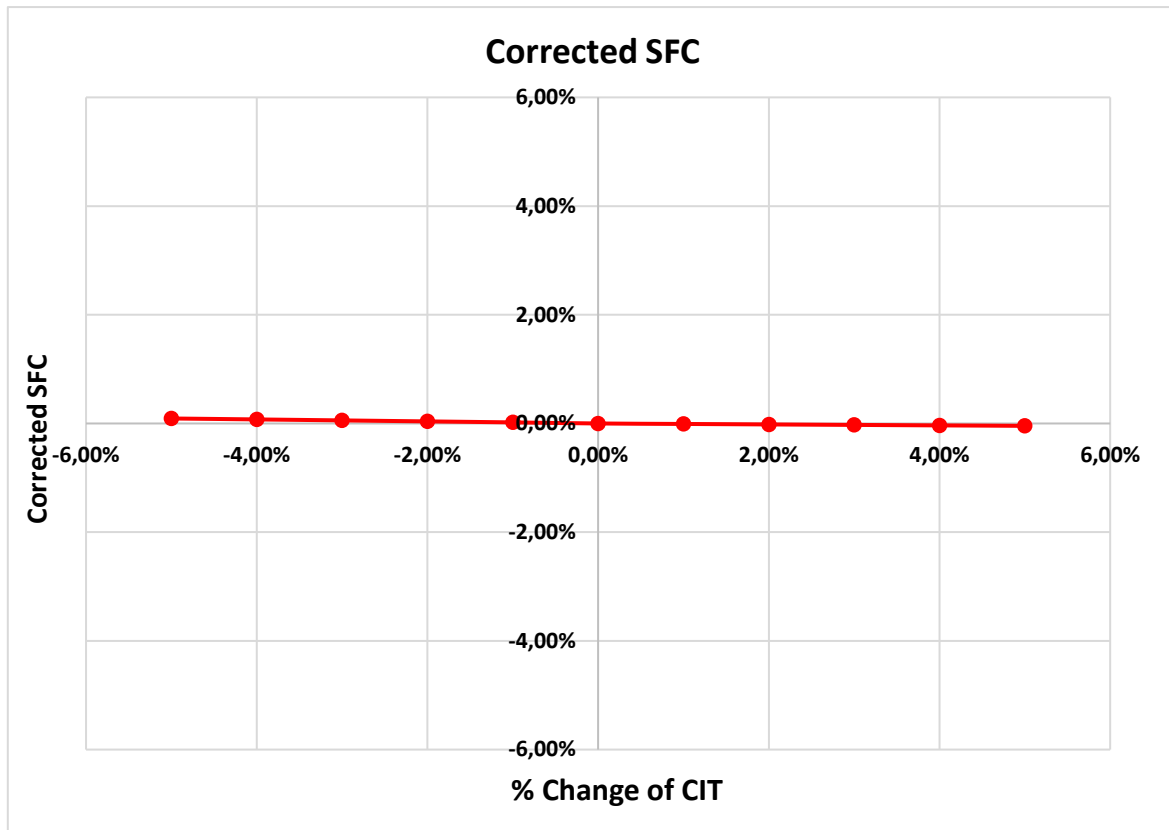
Σχεδόν αμετάβλητη είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου στις αυξομειώσεις της CIT. Υπάρχει μια απειροελάχιστη μείωση του s.f.c κατά την αύξησή της, αλλά σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι τυχόν μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα πριν την συμπίεσή του, επηρεάζει είτε αρνητικά είτε θετικά την ειδική κατανάλωση.



Σχήμα 5.7: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της CIT.



Σχήμα 5.8: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της CIT.

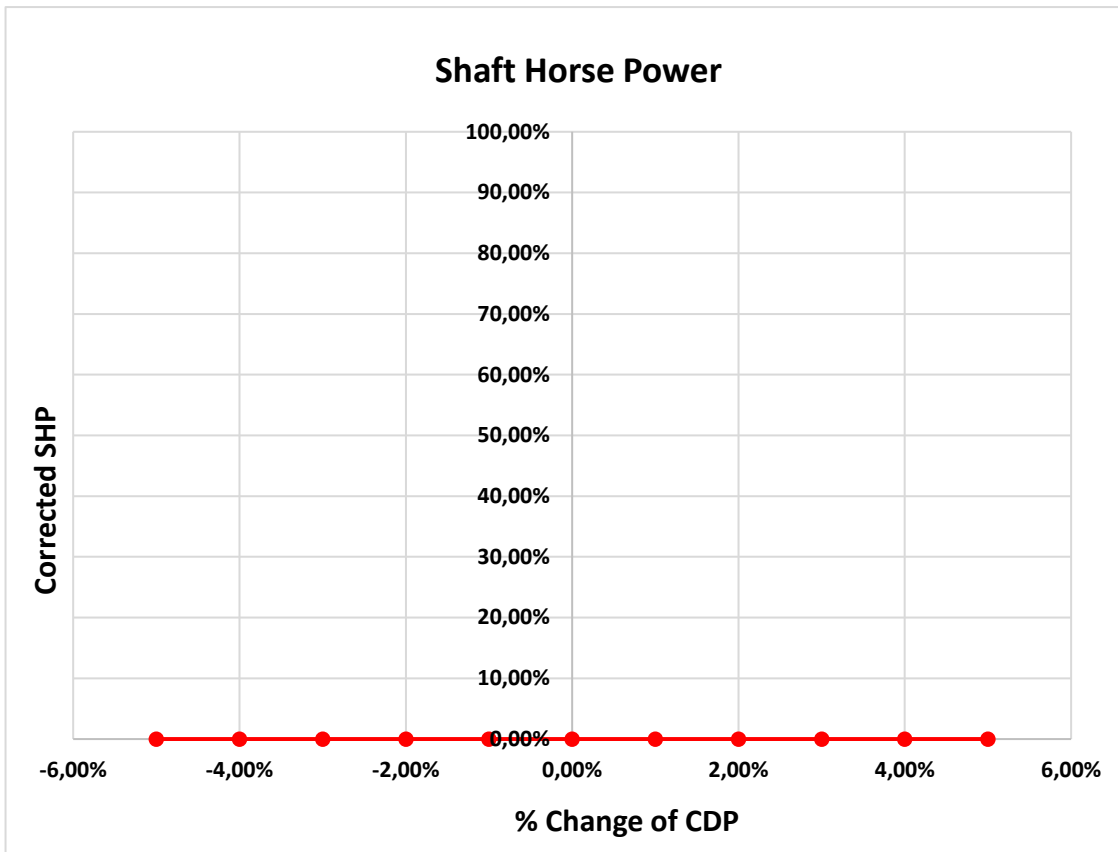


Σχήμα 5.9: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της CIT.

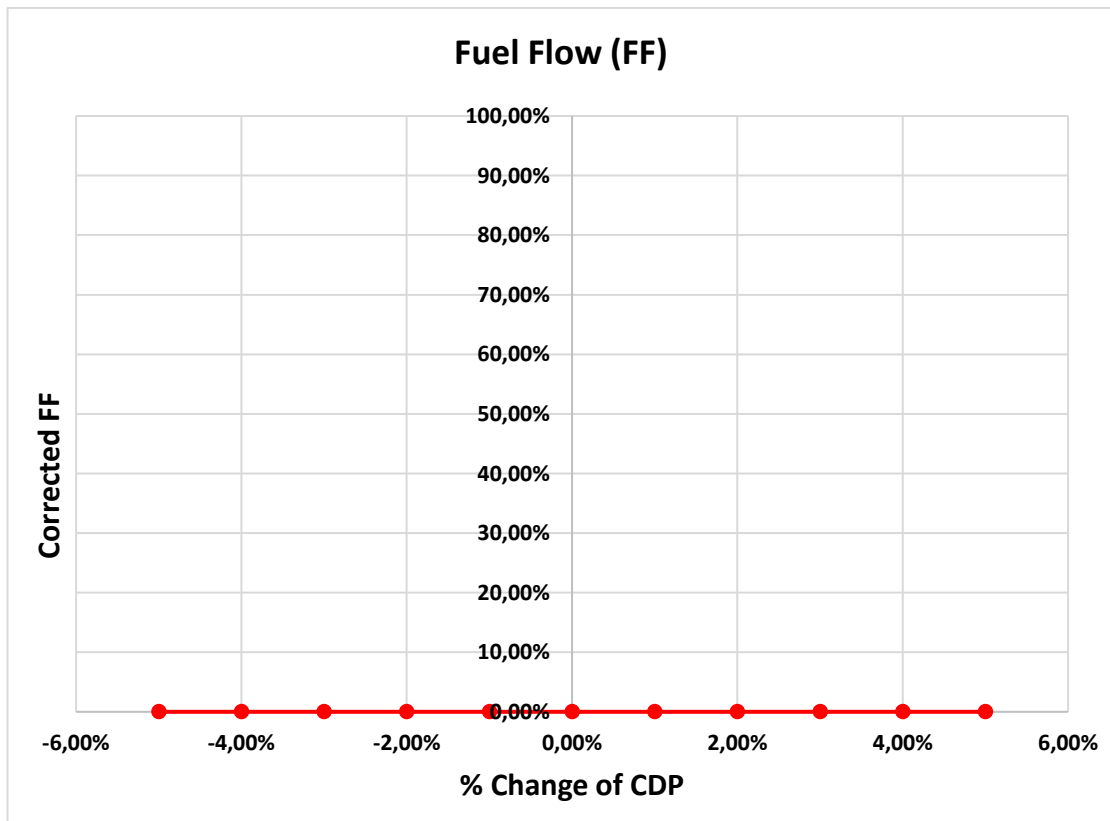
5.1.4. Πίεση Συμπιεσμένου Αέρα στην Έξοδο του Συμπιεστή

Change in % of CDP	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-4,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-3,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-2,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-1,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4,00%	0,00%	0,00%	0,00%
5,00%	0,00%	0,00%	0,00%

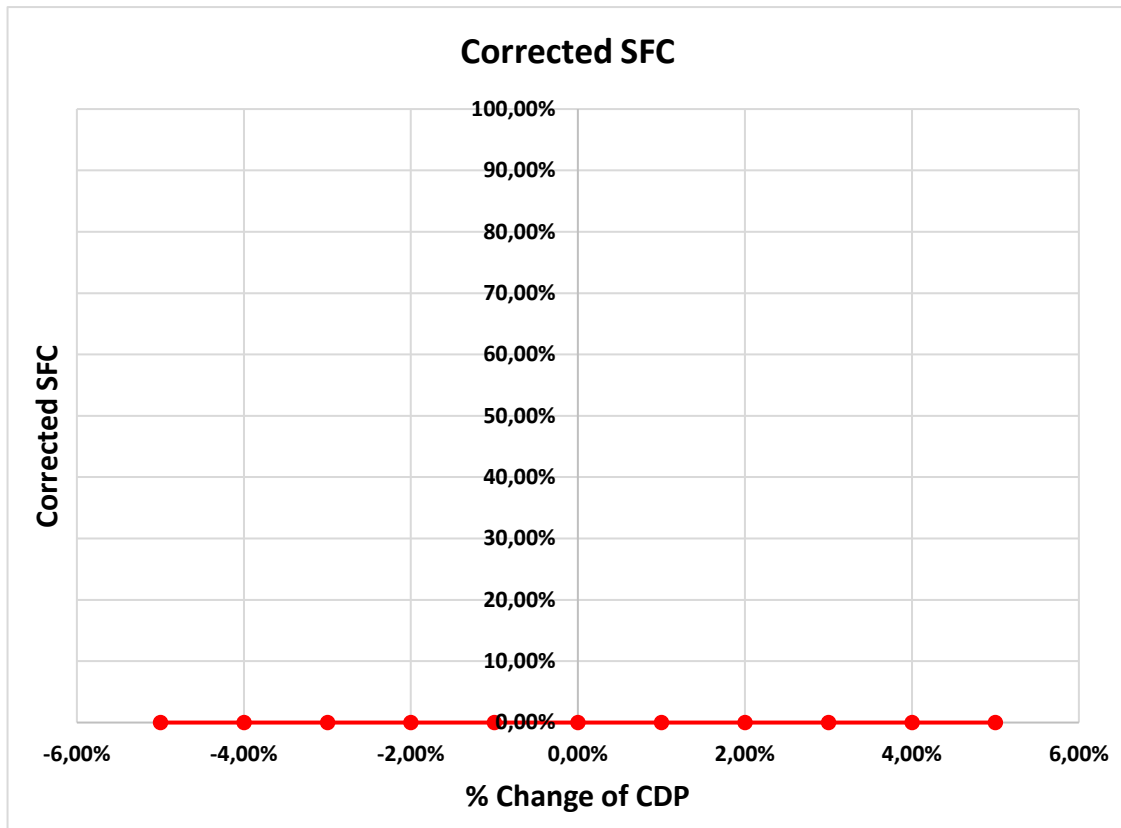
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της CDP.



Σχήμα 5.10: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της CDP.



Σχήμα 5.11: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της CDP.



Σχήμα 5.12: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της CDP.

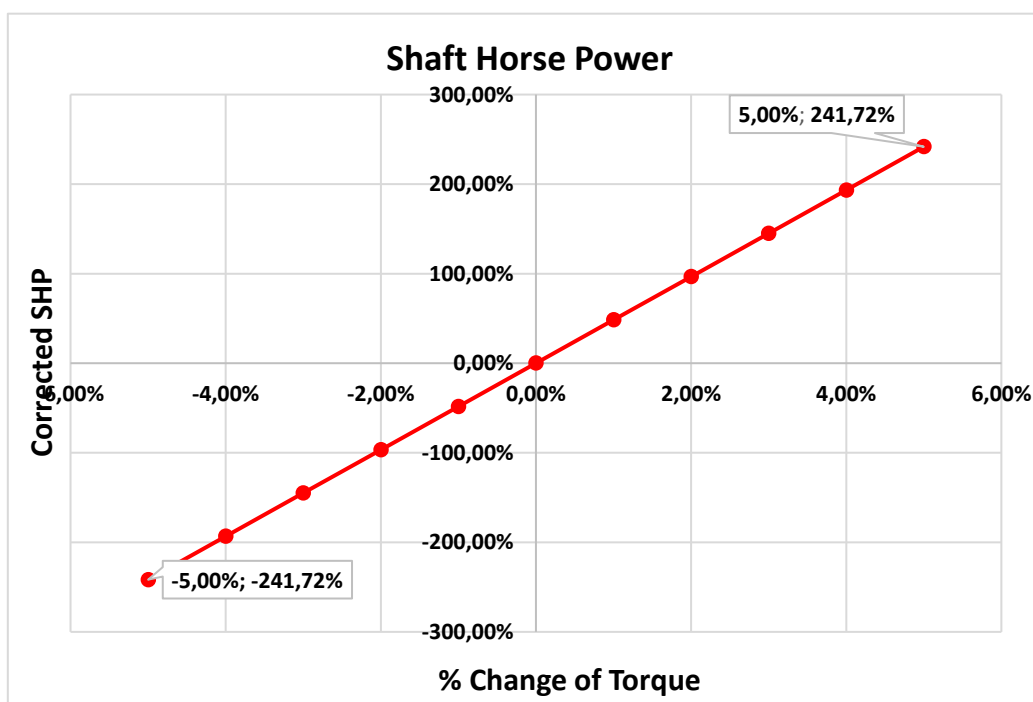
5.1.5. Παραγόμενη Ροπή (Torque)

Προτού παρατεθούν τα αποτελέσματα και τα αντιπροσωπευτικά διαγράμματα είναι δεδομένο ότι οποιαδήποτε μεταβολή της ροπής θα έχει άμεσο αντίκτυπο στα αποδιδόμενα άλογα άξονα (shaft horse power). Εξάλλου η λειτουργία ενός ελικοστρόβιλου κινητήρα βασίζεται στην παραγωγή ροπής για την κίνηση της προπέλας, η οποία ροπή αναπτύσσεται από την μετατροπή της ενέργειας των εκτονωμένων καυσαερίων σε μηχανικό έργο άξονα.

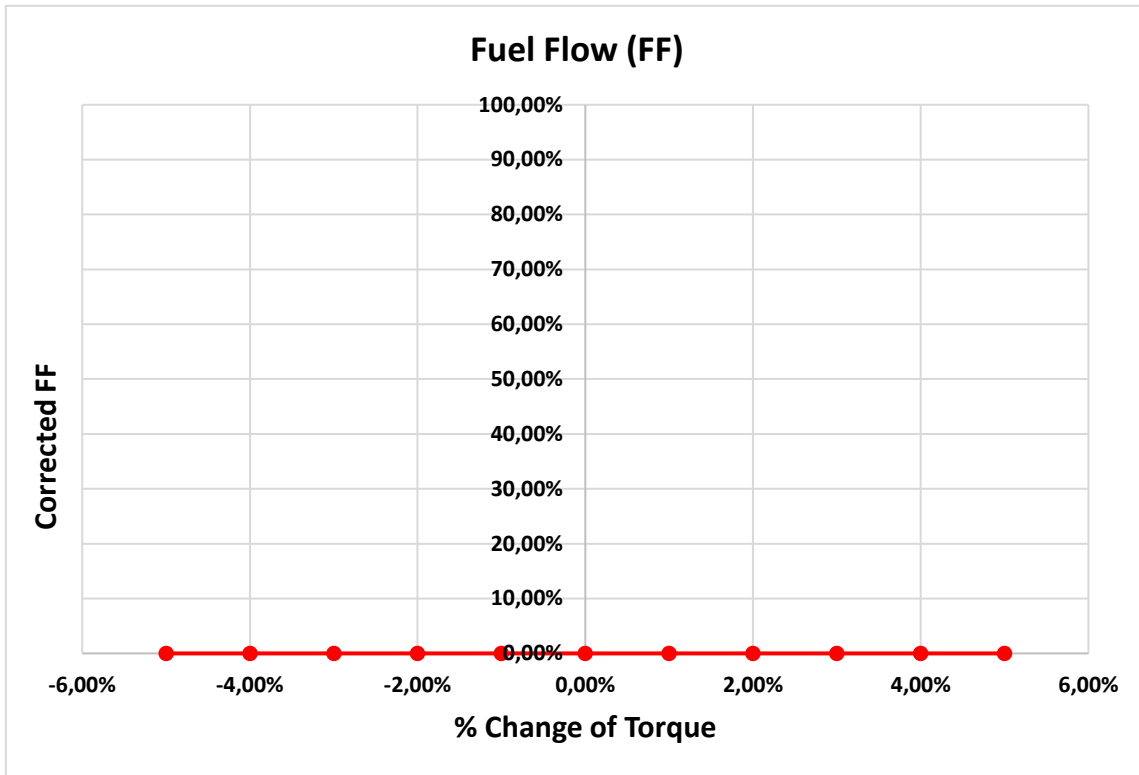
Change in % of Torque	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	-241,72%	0,00%	2,44%
-4,00%	-193,33%	0,00%	1,95%
-3,00%	-144,95%	0,00%	1,45%
-2,00%	-96,77%	0,00%	0,97%
-1,00%	-48,39%	0,00%	0,48%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	48,39%	0,00%	-0,48%
2,00%	96,56%	0,00%	-0,96%
3,00%	144,95%	0,00%	-1,41%
4,00%	193,33%	0,00%	-1,89%
5,00%	241,72%	0,00%	-2,35%

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της Torque.

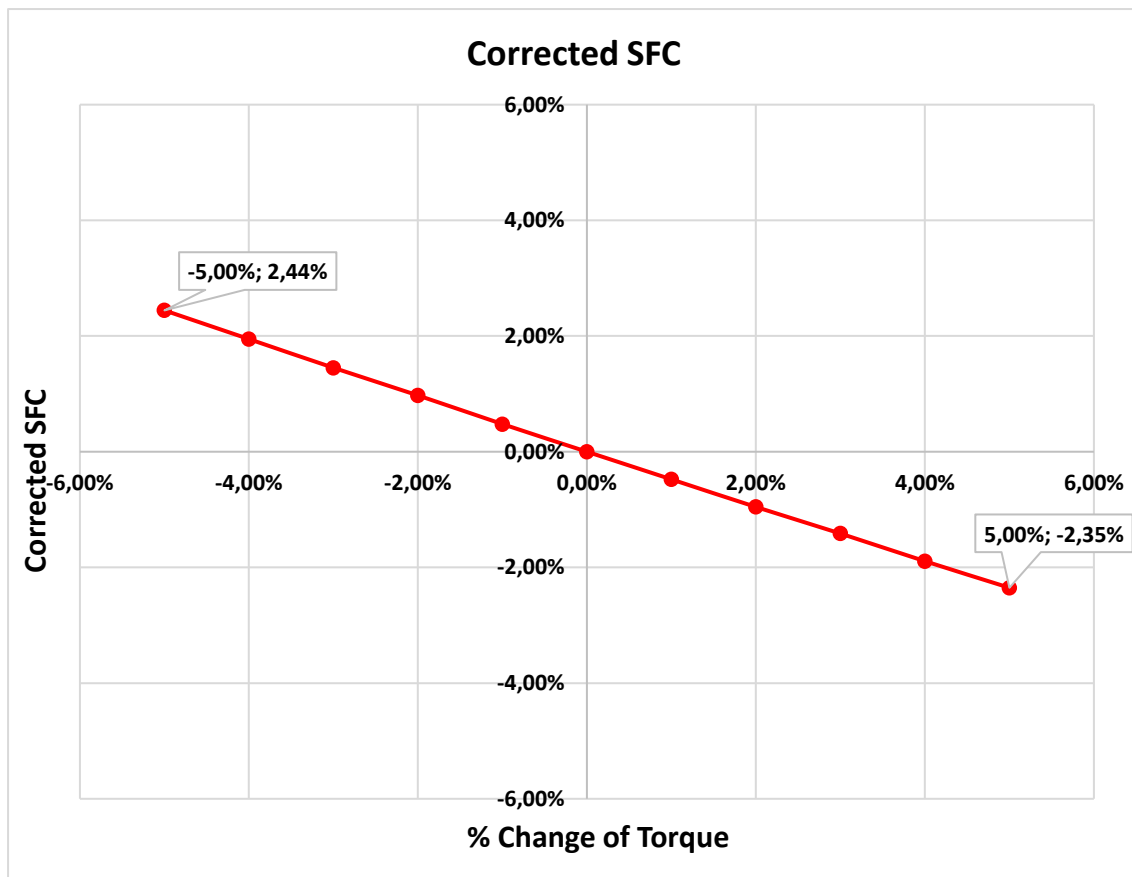
Ανεπηρέαστη φαίνεται να παραμένει η τιμή της ροής του καυσίμου, ενώ ελάχιστη ευαισθησία παρουσιάζει η ειδική κατανάλωση καυσίμου, με αναμενόμενη μείωση σε αύξηση της ροπής και την αναμενόμενη αύξηση σε μείωσή της.



Σχήμα 5.13: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της Ροπής.



Σχήμα 5.14: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της Ροπής.



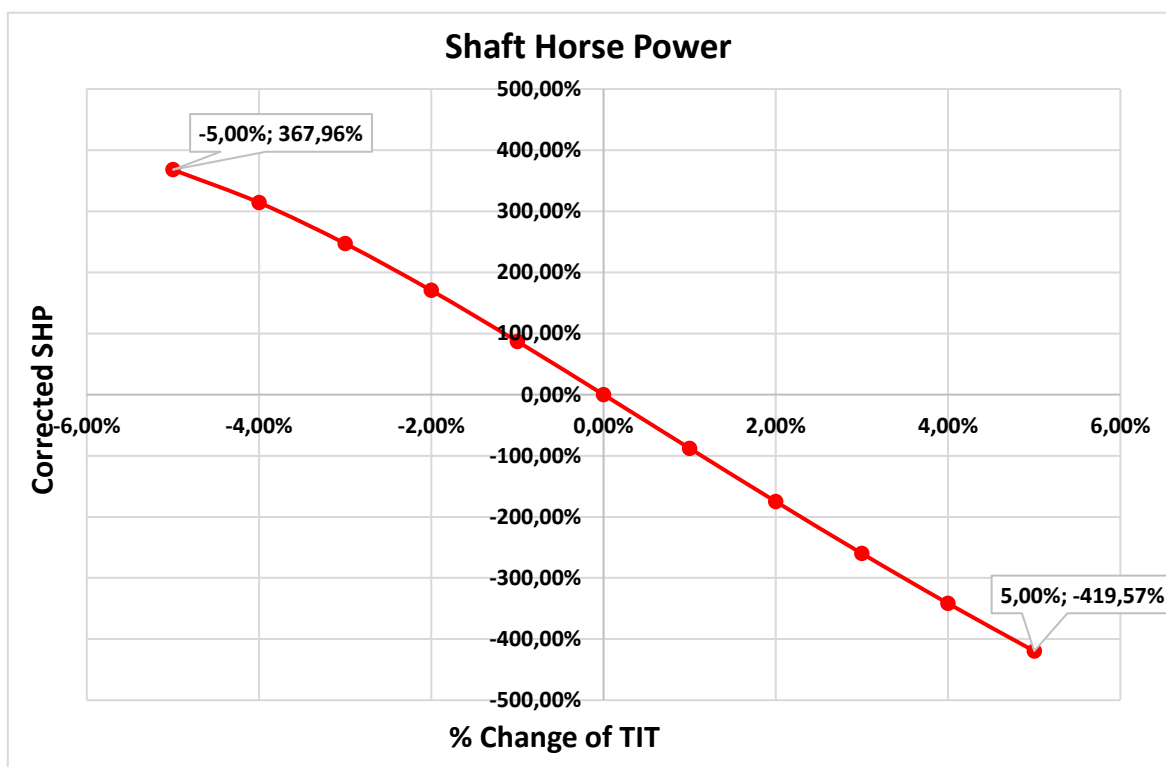
Σχήμα 5.15: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της Ροπής.

5.1.6. Θερμοκρασία Εισόδου Αέρα στον Στρόβιλο (TIT)

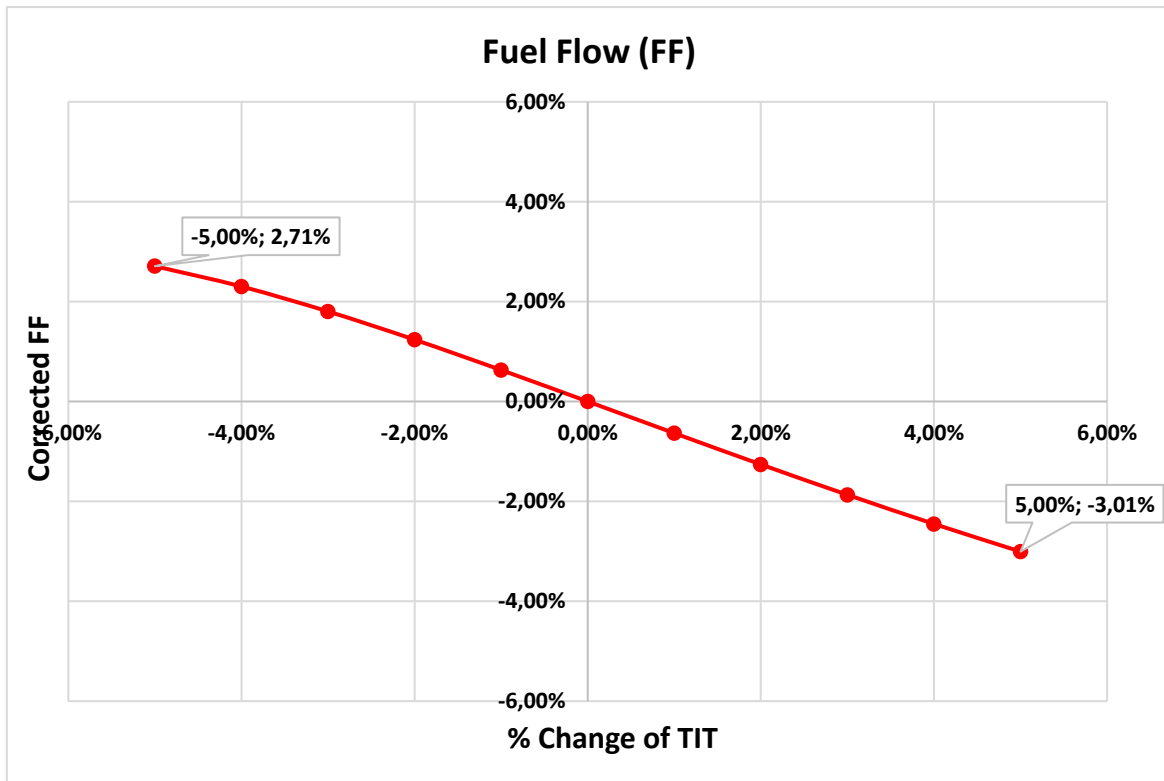
Η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον στρόβιλο ή αλλιώς TIT αποτελεί μια εκ των κρισιμότερων παραμέτρων για τη συμπεριφορά του Α/Κ. Ο εκάστοτε κατασκευαστής στηρίζει όλη τη διαδικασία του Performance σε φάση πτήσης που αντιπροσωπεύει μια χαρακτηριστική τιμή της TIT. Είναι ζωτικής σημασίας η επίτευξή της, για την εγκυρότητα της διαδικασίας αξιολόγησης των επιδόσεων. Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρθηκε, για τύπο T56-A-15, ότι η εν λόγω τιμή αγγίζει τους 1077°C.

Change in % of TIT	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	367,96%	2,71%	-0,92%
-4,00%	314,19%	2,30%	-0,79%
-3,00%	247,10%	1,80%	-0,64%
-2,00%	170,32%	1,24%	-0,44%
-1,00%	86,88%	0,63%	-0,24%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	-87,96%	-0,63%	0,24%
2,00%	-175,05%	-1,26%	0,48%
3,00%	-260,00%	-1,87%	0,72%
4,00%	-341,72%	-2,45%	0,97%
5,00%	-419,57%	-3,01%	1,19%

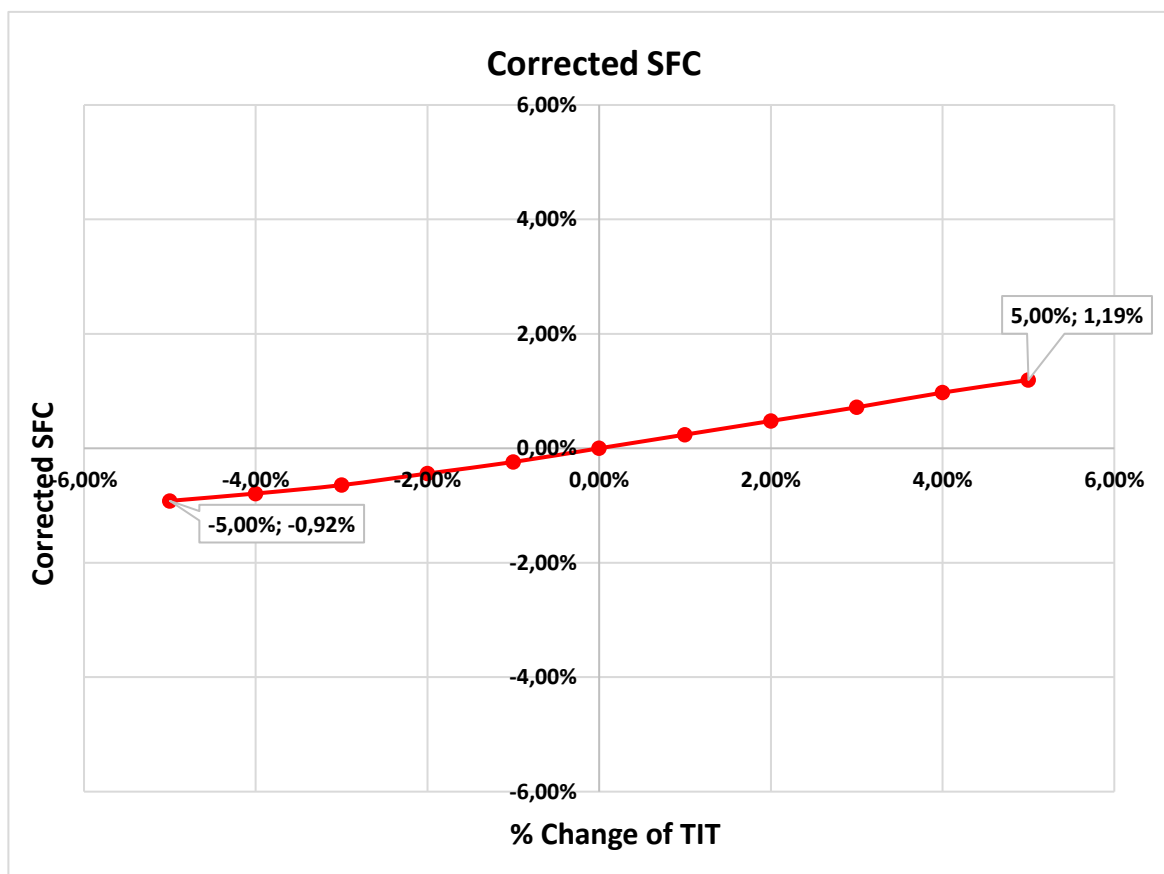
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της TIT.



Σχήμα 5.16: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει της TIT.



Σχήμα 5.17: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της TIT.



Σχήμα 5.18: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της TIT.

Είναι απολύτως λογική η μείωση των αποδιδόμενων αλόγων που παρατηρείται σε σχέση με αύξηση της τιμής της TIT και αντίστοιχα αύξηση του SHP σε περίπτωση μείωσή της. Όπως εξηγήθηκε στην αρχή του Κεφαλαίου 5, οποιαδήποτε μεταβολή της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στον στρόβιλο από την αναμενόμενη τιμή των 1077°C, εξαιτίας της μεθοδολογίας που αναπτύσσεται για την διόρθωση των τιμών, απορροφάται λόγω της παρουσίας της καμπύλης (curve). Οι μετρήσεις θα ληφθούν σε τιμές όσο το δυνατόν κοντύτερα από αυτές που απαιτεί η βιβλιογραφία. Θα κατασκευαστεί από το λογισμικό καμπύλη (curve) βάσει αυτών των τιμών για τα μεγέθη της ροής καυσίμου (FF) και της ιπποδύναμης του άξονα (SHP), όπου από αυτές τις καμπύλες θα υπολογιστεί τελικώς πόσο θα ήταν τα προαναφερθέντα μεγέθη στις απαιτούμενες συνθήκες θερμοκρασίας βάσει βιβλιογραφίας.

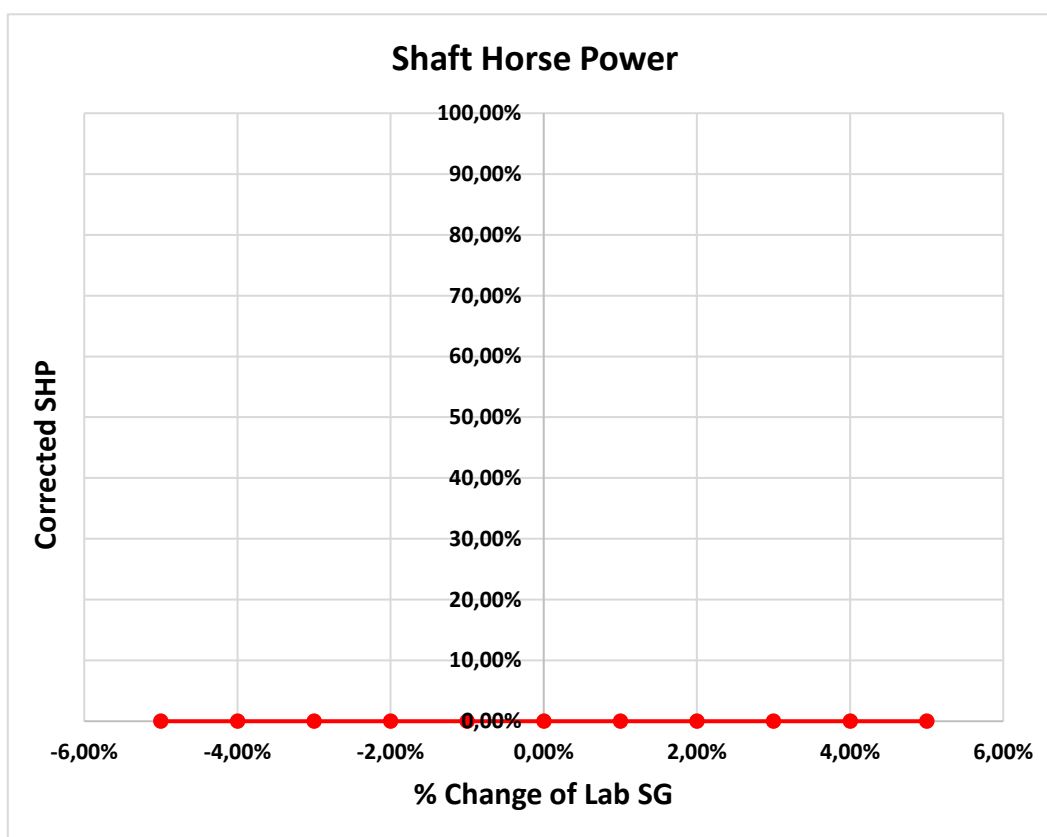
Επομένως, τιμές μεγαλύτερες των 1077°C, βάσει διαδικασίας θα αντιστοιχίζονται μειωμένες στους 1077°C και άρα βάσει αυτής της τεχνητής μείωσης, ο Α/Κ θα εμφανίζεται να λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αντίθετα, χαμηλότερες τιμές TIT, θα αντιστοιχίζονται τεχνητά σε υψηλότερη θερμοκρασία και κατά συνέπεια ο κινητήρας θα παρουσιάζει ψευδώς βελτιστοποιημένες αποδόσεις.

5.1.7. Ειδικό Βάρος Καυσίμου (Lab SG)

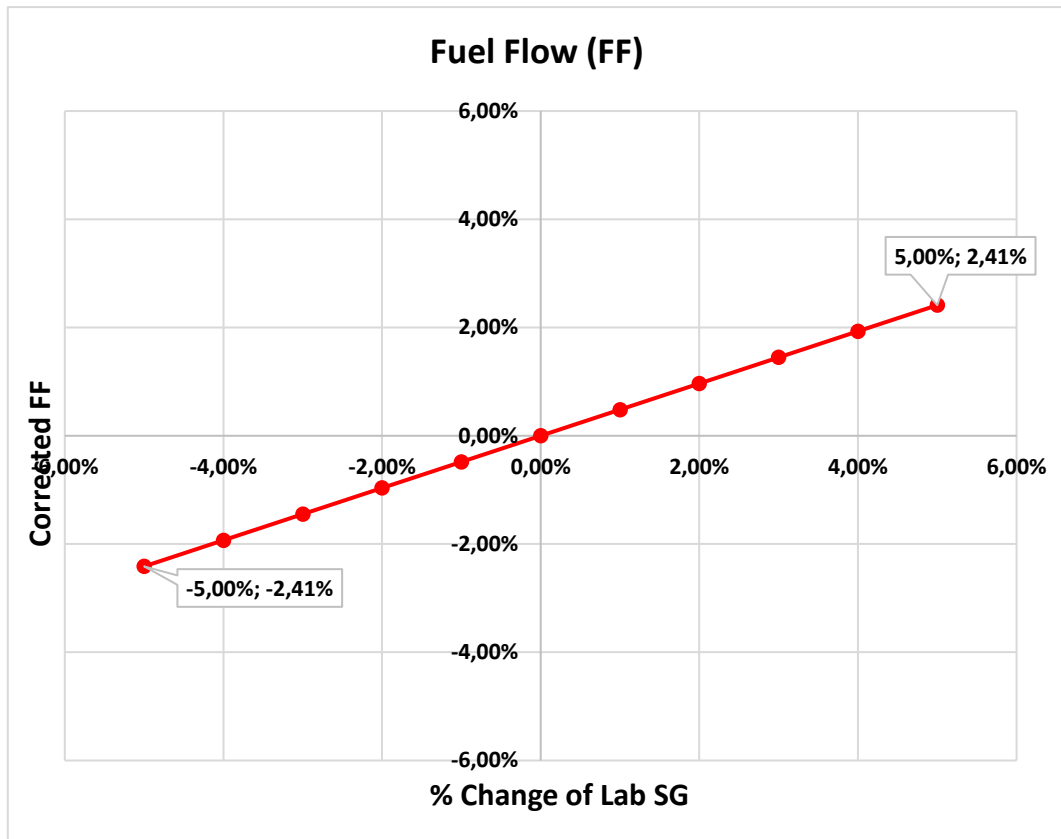
Συνεπακόλουθο της μεταβολής του ειδικού βάρους του καυσίμου είναι οι μεταβολές που σχετίζονται με την ειδική κατανάλωσή του (s.f.c.) και την ροή του (FF). Σε ό,τι αφορά την αποδιδόμενη ισχύ, η επιρροή που της ασκείται είναι ανύπαρκτη.

Change in % of Lab SG	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	0,00%	-2,41%	-2,41%
-4,00%	0,00%	-1,93%	-1,93%
-3,00%	0,00%	-1,45%	-1,45%
-2,00%	0,00%	-0,96%	-0,97%
-1,00%	0,00%	-0,48%	-0,48%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	0,00%	0,48%	0,48%
2,00%	0,00%	0,96%	0,96%
3,00%	0,00%	1,45%	1,45%
4,00%	0,00%	1,93%	1,93%
5,00%	0,00%	2,41%	2,41%

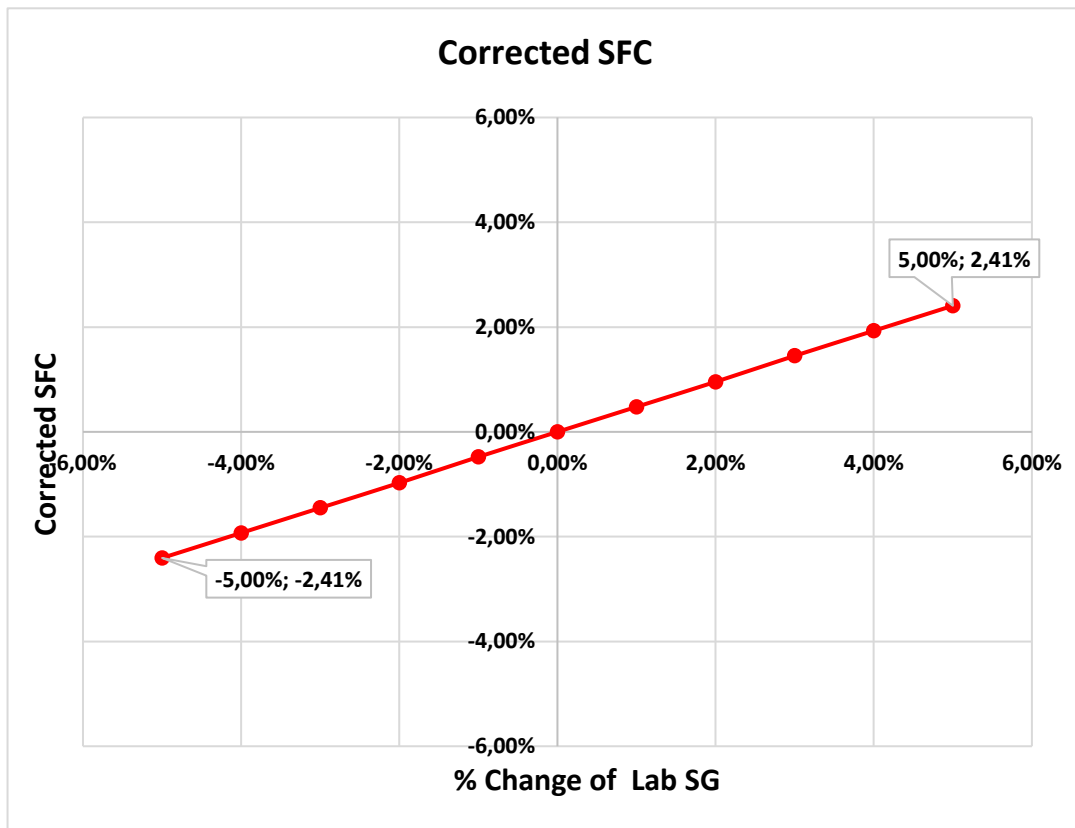
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της Lab SG.



Σχήμα 5.19: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει του Lab SG.



Σχήμα 5.20: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της Lab SG.

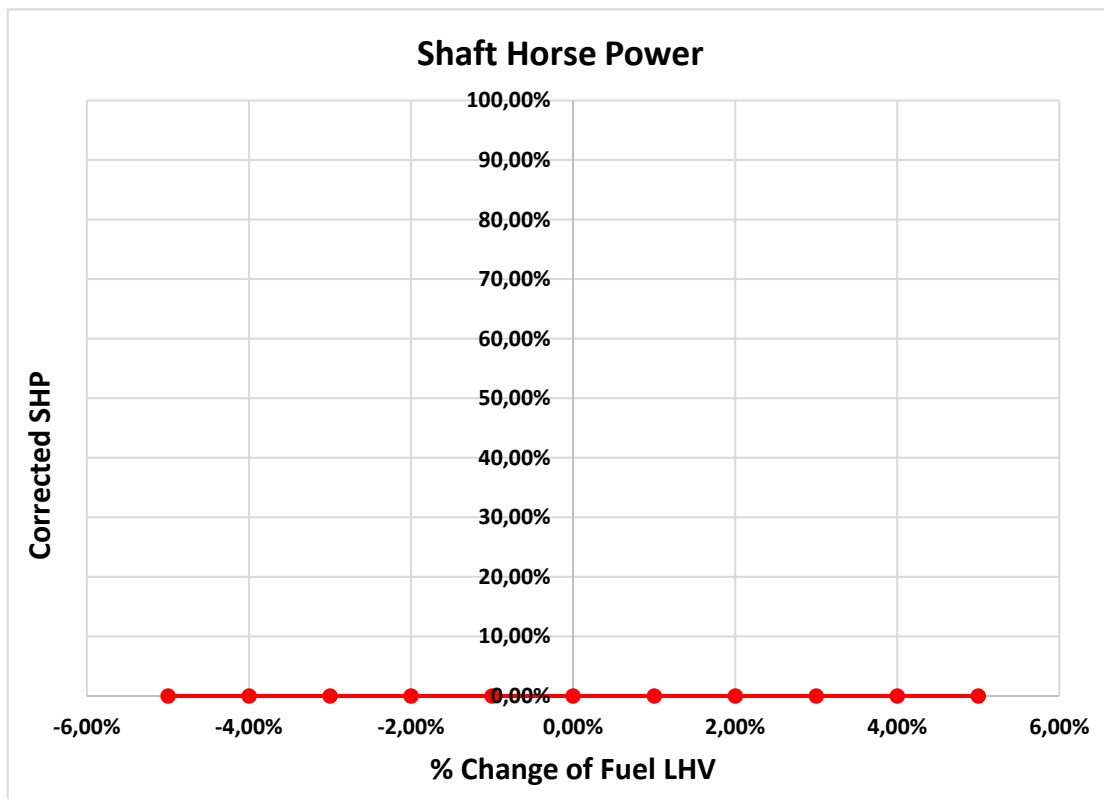


Σχήμα 5.21: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της Lab SG.

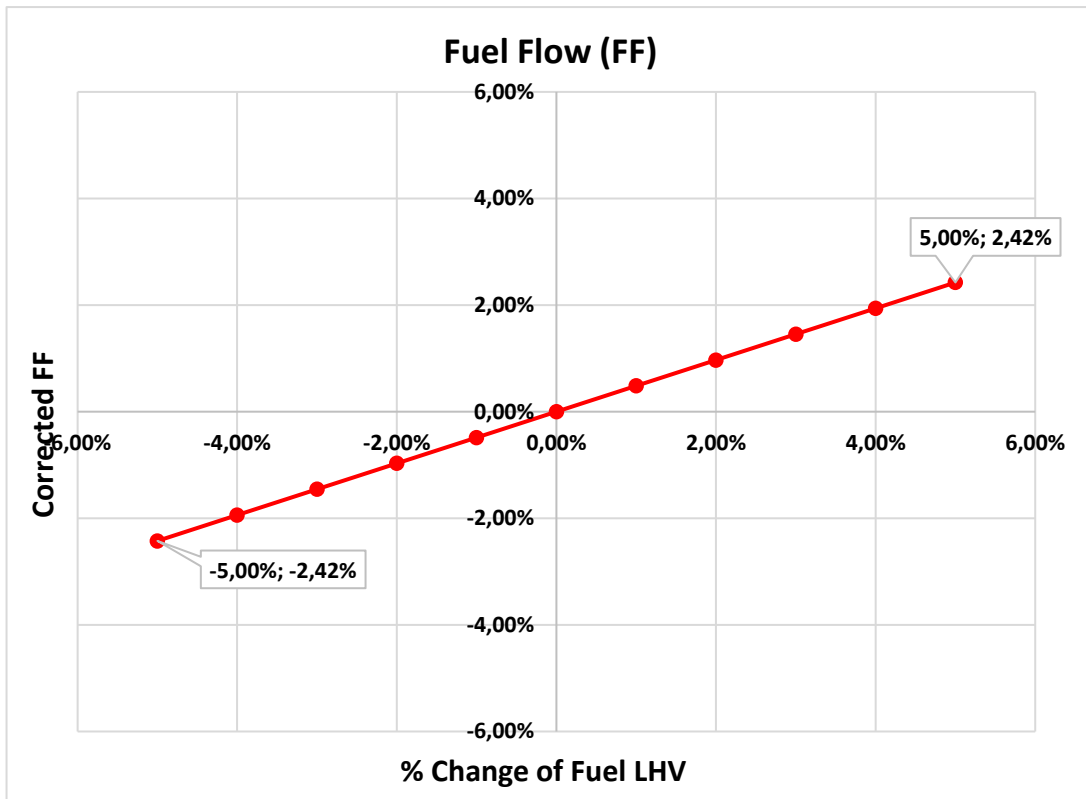
5.1.8. Θερμογόνος Δύναμη Καυσίμου (Fuel LHV)

Change in % of Fuel LHV	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	0,00%	-2,42%	-2,43%
-4,00%	0,00%	-1,94%	-1,95%
-3,00%	0,00%	-1,45%	-1,45%
-2,00%	0,00%	-0,97%	-0,97%
-1,00%	0,00%	-0,49%	-0,50%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	0,00%	0,49%	0,48%
2,00%	0,00%	0,97%	0,97%
3,00%	0,00%	1,45%	1,45%
4,00%	0,00%	1,94%	1,93%
5,00%	0,00%	2,42%	2,43%

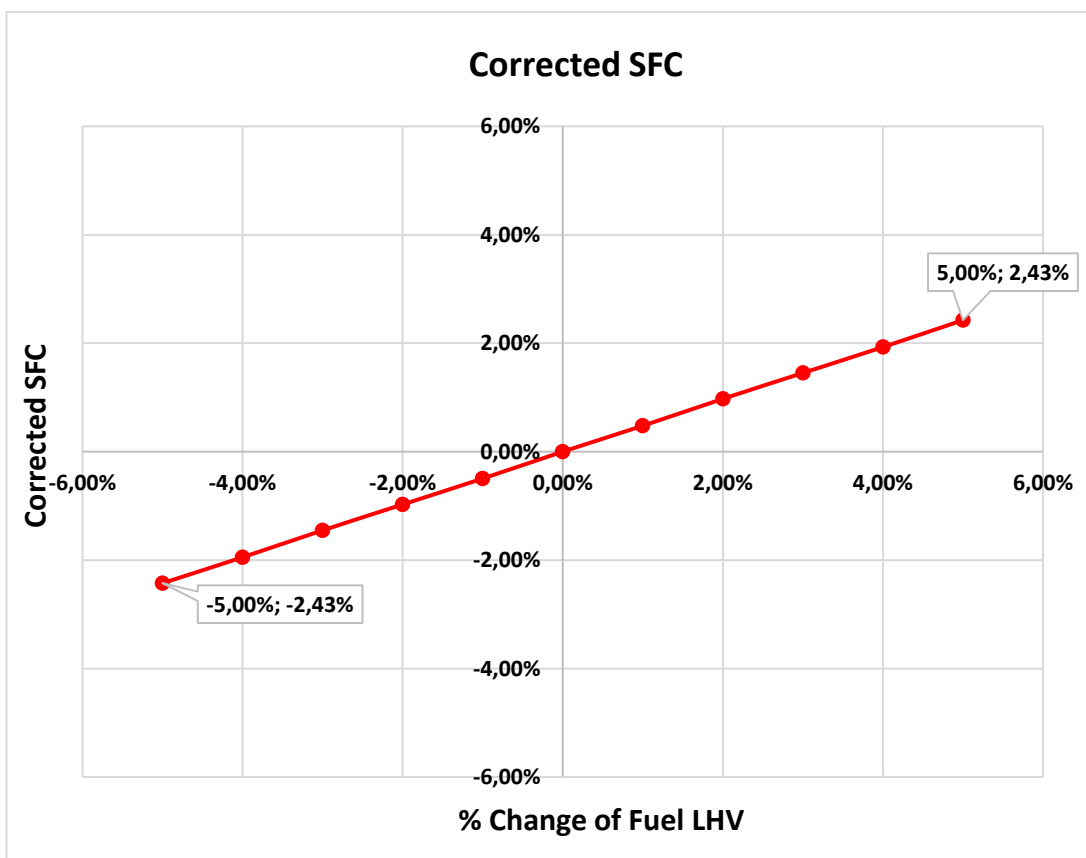
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της Fuel LHV.



Σχήμα 5.22: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει του Fuel LHV.



Σχήμα 5.23: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της Fuel LHV.

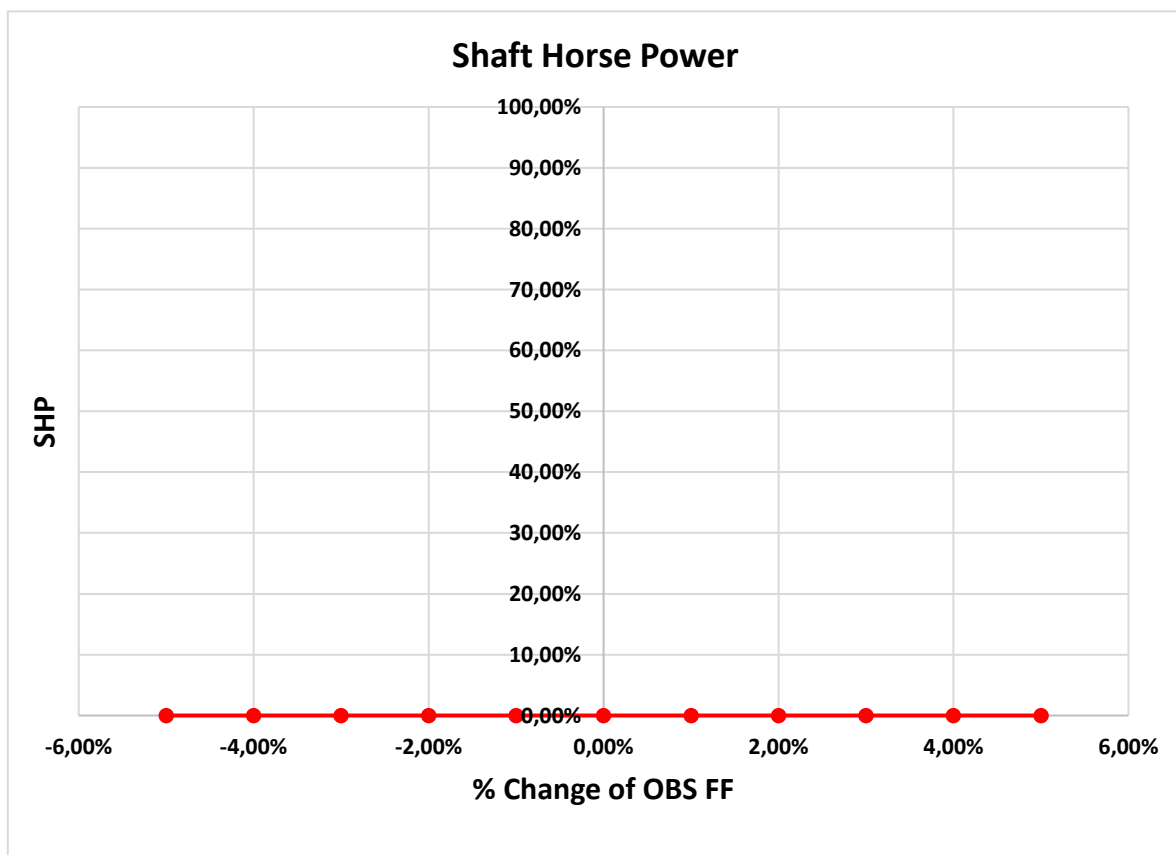


Σχήμα 5.24: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της Fuel LHV.

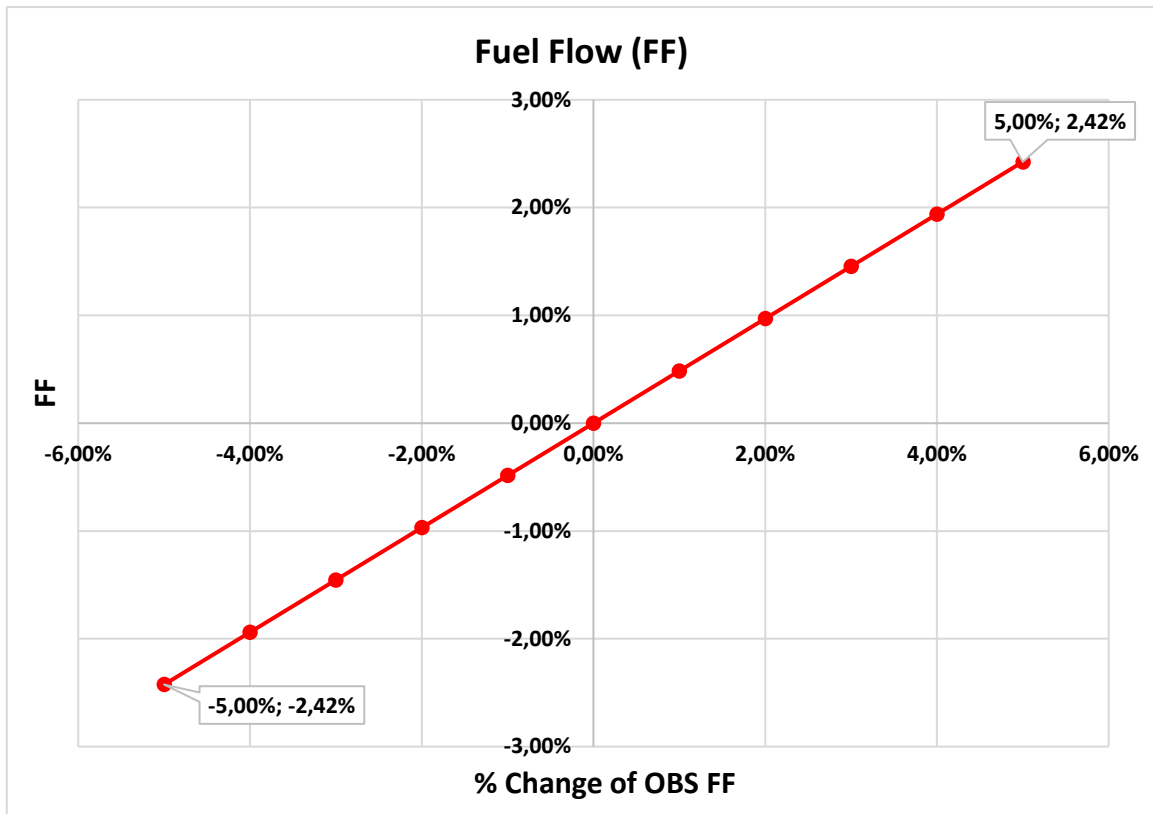
5.1.9. Observed τιμές της Ροής Καυσίμου (OBS FF)

Change in % of OBS FF	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	0,00%	-2,42%	-2,43%
-4,00%	0,00%	-1,94%	-1,95%
-3,00%	0,00%	-1,45%	-1,45%
-2,00%	0,00%	-0,97%	-0,97%
-1,00%	0,00%	-0,49%	-0,50%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	0,00%	0,49%	0,48%
2,00%	0,00%	0,97%	0,97%
3,00%	0,00%	1,45%	1,45%
4,00%	0,00%	1,94%	1,93%
5,00%	0,00%	2,42%	2,43%

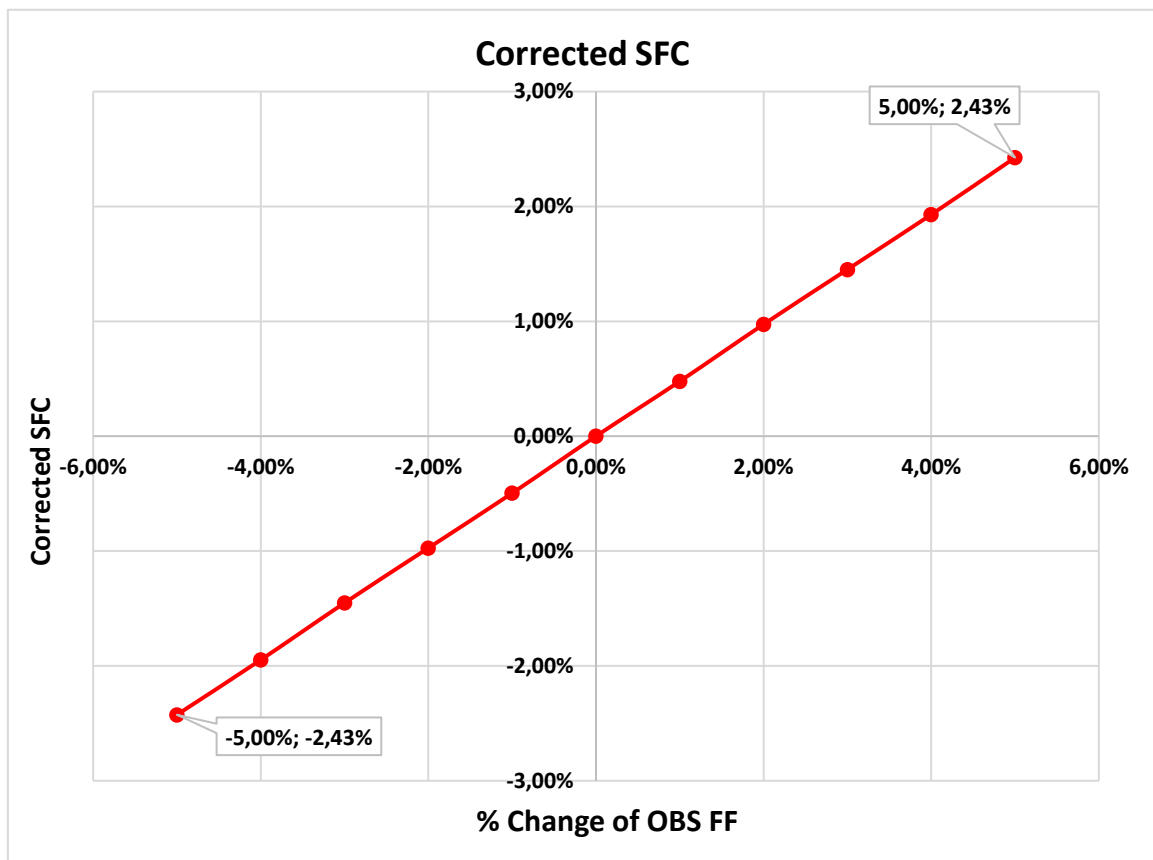
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής της OBS FF.



Σχήμα 5.25: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει του OBS FF.



Σχήμα 5.26: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του Fuel Flow συναρτήσει της OBS FF.



Σχήμα 5.27: Γραφική απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει της OBS FF.

5.2. Προσδιορισμός Σημαντικότερων Μετρούμενων Παραμέτρων και Συνδυασμένη Μεταβολή Αυτών

Στην προηγούμενη ενότητα πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση με τη συμμετοχή όλων των παραμέτρων που συμμετέχουν στη διαδικασία αξιολόγησης των επιδόσεων του κινητήρα. Υπήρξαν μεταβλητές που έδειξαν να ασκούν μεγαλύτερη επιρροή στα μεγέθη των διορθωμένων τιμών του TMHP, του FF και του s.f.c., αλλά υπήρξαν και μεγέθη που έδειξαν να επηρεάζουν ελάχιστα έως και καθόλου.

Παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη ευαισθησία στην τιμή της διορθωμένης αποδιδόμενης ισχύος (Corrected TMHP) με τεράστιες αυξομειώσεις της αρχικής της τιμής, κατά την ποσοστιαία μεταβολή 5% της πίεσης εισόδου του αέρα στο συμπιεστή (P_{t2}), της πίεσης αναφοράς του χώρου διεξαγωγής της δοκιμής (P_{s7}), της αποδιδόμενης ροπής (Torque) και τέλος της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στον στρόβιλο (TIT). Η διαφοροποίηση κατά 0,15 μονάδες ανά 1% είτε προσθετικής είτε αφαιρετικής μεταβολής, είτε εκτόξευε είτε καταπόντιζε τα αποδιδόμενα άλογα του κινητήρα. Εν αντιθέσει με την πίεση εξόδου του αέρα από τον συμπιεστή (CDP), το OBS FF, το ειδικό βάρος (Lab SG) και την θερμογόνο δύναμη του καυσίμου (Fuel LHV) τα οποία παρέμειναν αμέτοχα με μηδενικές επιρροές. Η θερμοκρασία εισόδου αέρα στον συμπιεστή (CIT), μπορεί να πει κανείς πως ασκεί κάποια επίδραση στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος με τιμές που αγγίζουν το +50% και το -50% της διορθωμένης ιπποδύναμης, σε αύξηση και μείωση της τιμής της αντίστοιχα.

Όσον αφορά τα διορθωμένα μεγέθη της ειδικής κατανάλωσης και της ροής καυσίμου, κατά γενική ομολογία η ταλάντωση των τιμών τους από τις αρχικές, δεν ξεπερνά το ποσοστό του 5% σε καμία από τις εννέα περιπτώσεις ανάλυσης ευαισθησίας.

Η επόμενη φάση της μελέτης, είναι η συνδυασμένη πλέον μεταβολή επιλεγμένων ζευγών με στόχο πάντα τη μελέτη της συμπεριφοράς των τριών μεγεθών ενδιαφέροντος.

Το πρώτο ζεύγος απαρτίζεται από τις πιέσεις P_{t2} και P_{s7} , το δεύτερο από το συνδυασμό των τιμών της TIT και της Ροπής, το τρίτο στελεχώνεται από τα μεγέθη της observed τιμής του καυσίμου (OBS FF) και τη θερμογόνο δύναμη (Fuel LHV) που το χαρακτηρίζει και τέλος το τέταρτο και τελευταίο ζεύγος, είναι ο συνδυασμός του ειδικού βάρους (Lab SG) και ξανά της κατώτερης θερμογόνου δύναμης (Fuel LHV). Διατηρείται το εύρος της ποσοστιαίας μεταβολής +5% και -5%, καθώς και η ταυτότητα των διαγραμμάτων.

5.2.1. Συνδυασμένη Μεταβολή Pt₂ και Ps₇

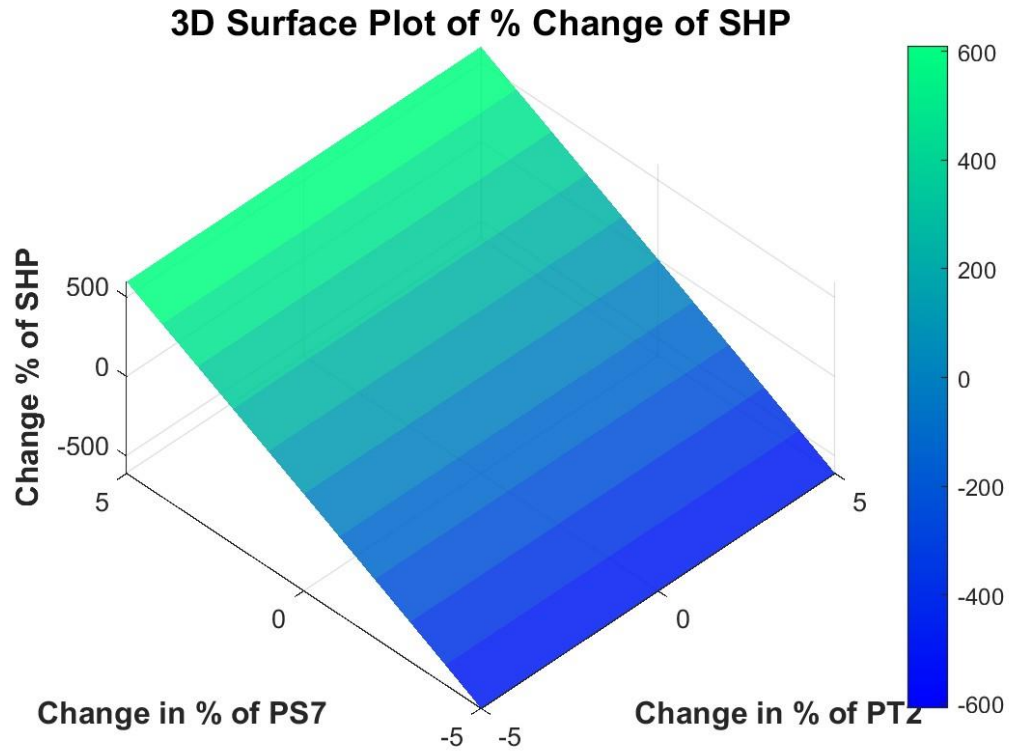
Οι πίνακες που ακολουθούν αφορούν την συνδυασμένη μεταβολή των Pt₂ και Ps₇. Στον πρώτο κατά σειρά, η άνοδος της Pt₂ συνοδεύεται από μείωση της Ps₇ ενώ στον δεύτερο οι τιμές και των δύο βαίνουν μειούμενες.

Change in % of PT2	Change in % of PS7	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	5,00%	597,20%	2,58%	-3,16%
-4,00%	4,00%	478,06%	2,04%	-2,57%
-3,00%	3,00%	358,92%	1,52%	-1,98%
-2,00%	2,00%	239,57%	1,00%	-1,34%
-1,00%	1,00%	120,00%	0,49%	-0,70%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	-1,00%	-120,43%	-0,49%	0,72%
2,00%	-2,00%	-241,51%	-0,96%	1,47%
3,00%	-3,00%	-363,01%	-1,43%	2,26%
4,00%	-4,00%	-485,16%	-1,88%	3,07%
5,00%	-5,00%	-608,17%	-2,33%	3,93%

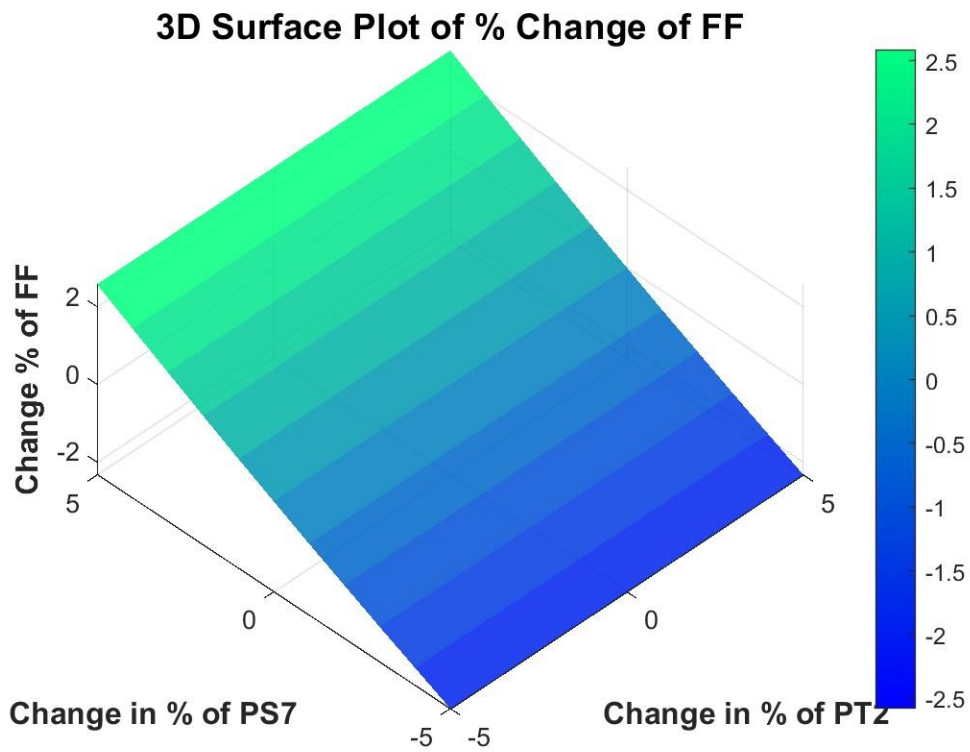
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των Pt₂ και Ps₇. (α)

Change in % of PT2	Change in % of PS7	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
5,00%	5,00%	-234,19%	-2,33%	-0,02%
4,00%	4,00%	-189,25%	-1,88%	-0,02%
3,00%	3,00%	-143,23%	-1,43%	0,00%
2,00%	2,00%	-96,56%	-0,96%	0,00%
1,00%	1,00%	-48,82%	-0,49%	0,00%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-1,00%	-1,00%	49,68%	0,49%	0,00%
-2,00%	-2,00%	100,43%	1,00%	0,00%
-3,00%	-3,00%	152,26%	1,52%	0,00%
-4,00%	-4,00%	205,16%	2,04%	0,00%
-5,00%	-5,00%	259,14%	2,58%	0,00%

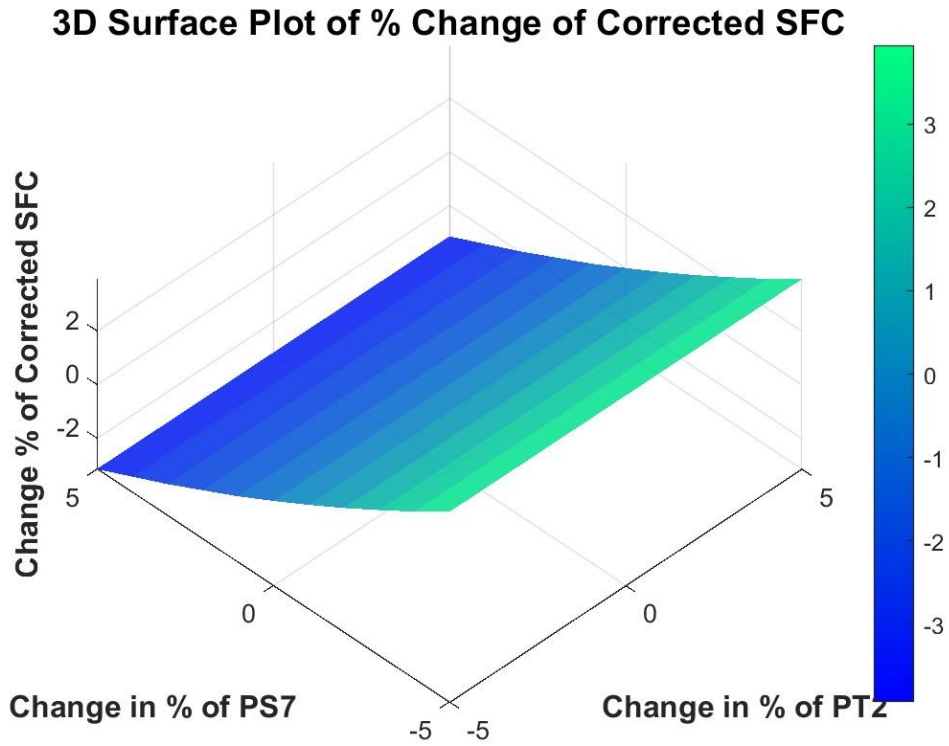
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των Pt₂ και Ps₇. (β)



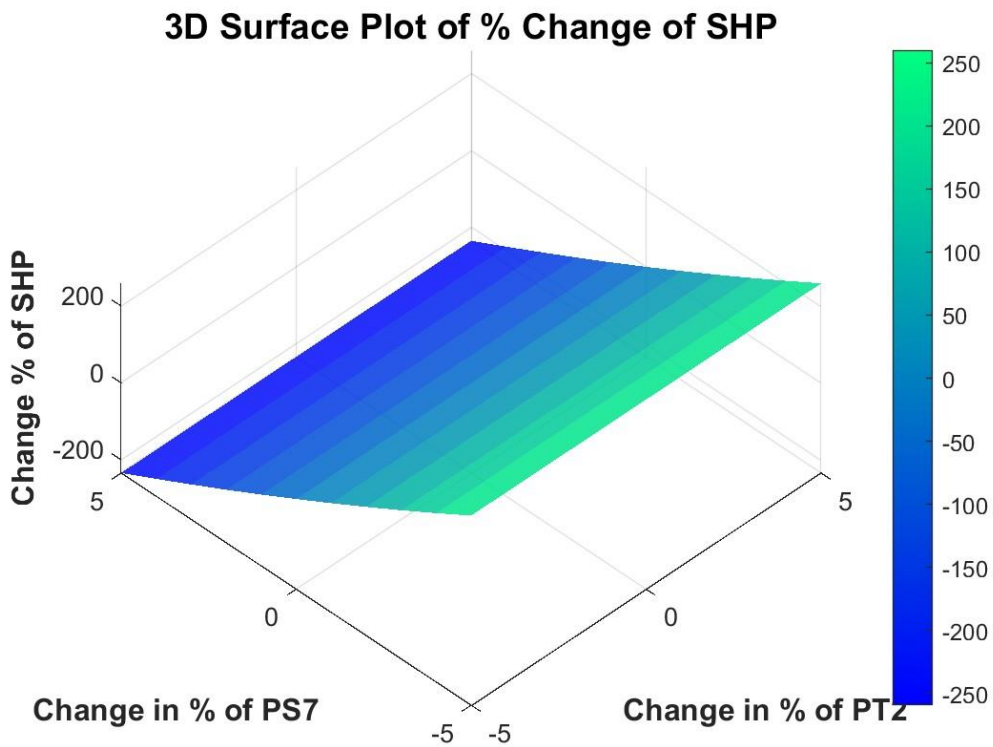
Σχήμα 5.28: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των Pt_2 και Ps_7 , με αύξηση της Pt_2 και ταυτόχρονη μείωση της Ps_7 .



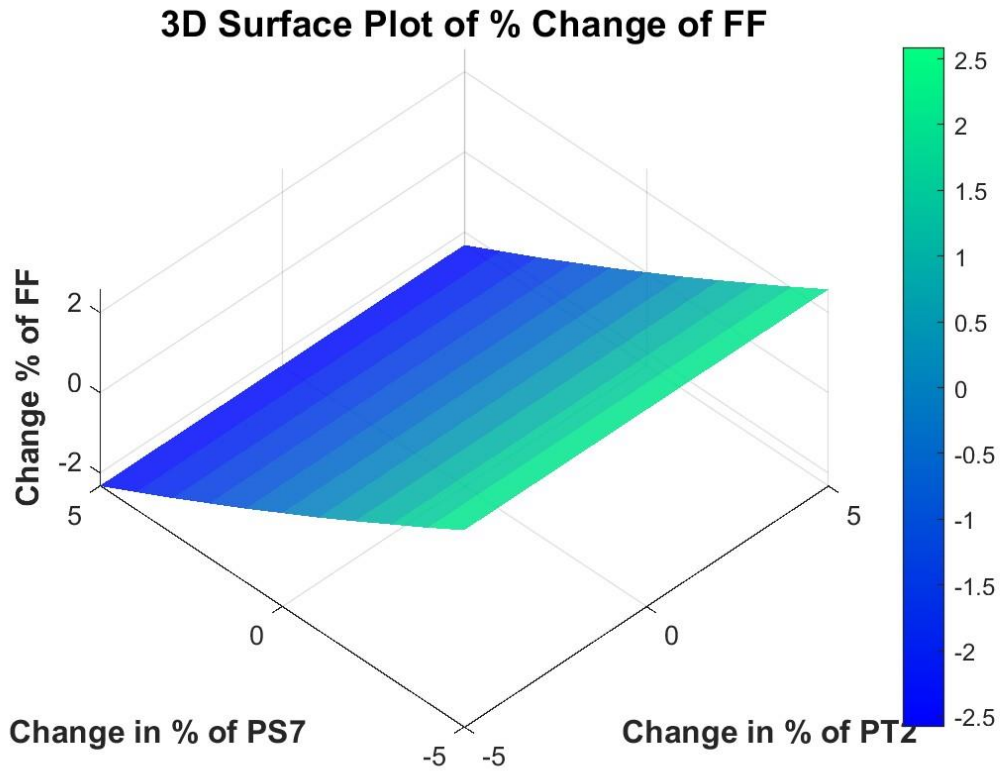
Σχήμα 5.29: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των Pt_2 και Ps_7 , με αύξηση της Pt_2 και ταυτόχρονη μείωση της Ps_7 .



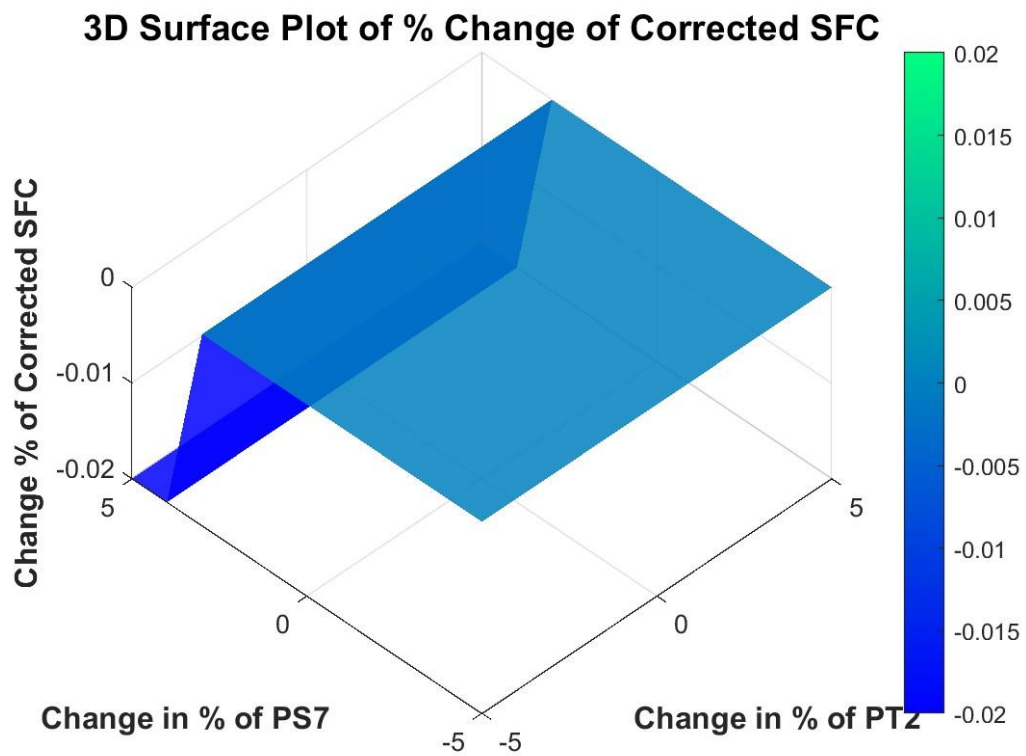
Σχήμα 5.30: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των P_{t2} και P_{s7} , με αύξηση της P_{t2} και ταυτόχρονη μείωση της P_{s7} .



Σχήμα 5.31: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των P_{t2} και P_{s7} , με ταυτόχρονη μείωση της P_{t2} και P_{s7} .



Σχήμα 5.32: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των Pt_2 και Ps_7 , με ταυτόχρονη μείωση της Pt_2 και Ps_7 .



Σχήμα 5.33: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των Pt_2 και Ps_7 , με ταυτόχρονη μείωση της Pt_2 και Ps_7 .

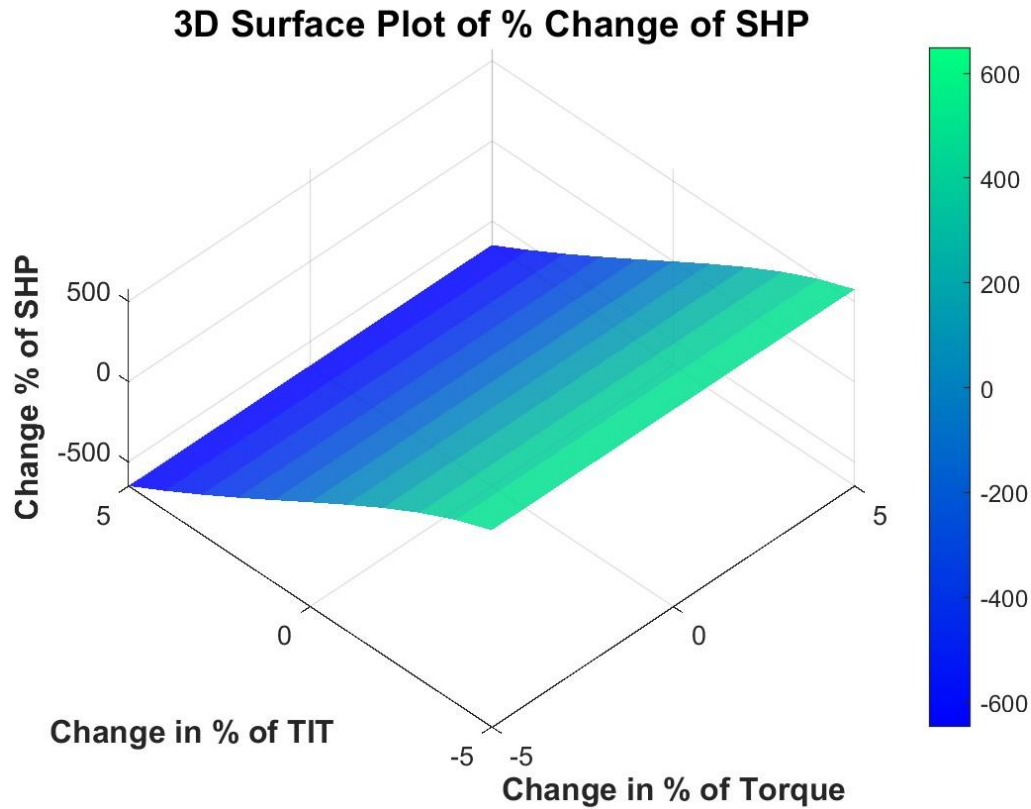
5.2.2. Συνδυασμένη Μεταβολή Θερμοκρασίας Εισόδου Αέρα στον Στρόβιλο (TIT) και Ροπής (Torque)

Change in % of Torque	Change in % of TIT	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	5,00%	-647,74%	-3,01%	3,66%
-4,00%	4,00%	-527,96%	-2,45%	2,94%
-3,00%	3,00%	-401,94%	-1,87%	2,20%
-2,00%	2,00%	-270,97%	-1,26%	1,47%
-1,00%	1,00%	-136,34%	-0,63%	0,72%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	-1,00%	134,84%	0,63%	-0,70%
2,00%	-2,00%	264,73%	1,24%	-1,36%
3,00%	-3,00%	384,95%	1,80%	-1,95%
4,00%	-4,00%	490,54%	2,30%	-2,44%
5,00%	-5,00%	575,91%	2,71%	-2,85%

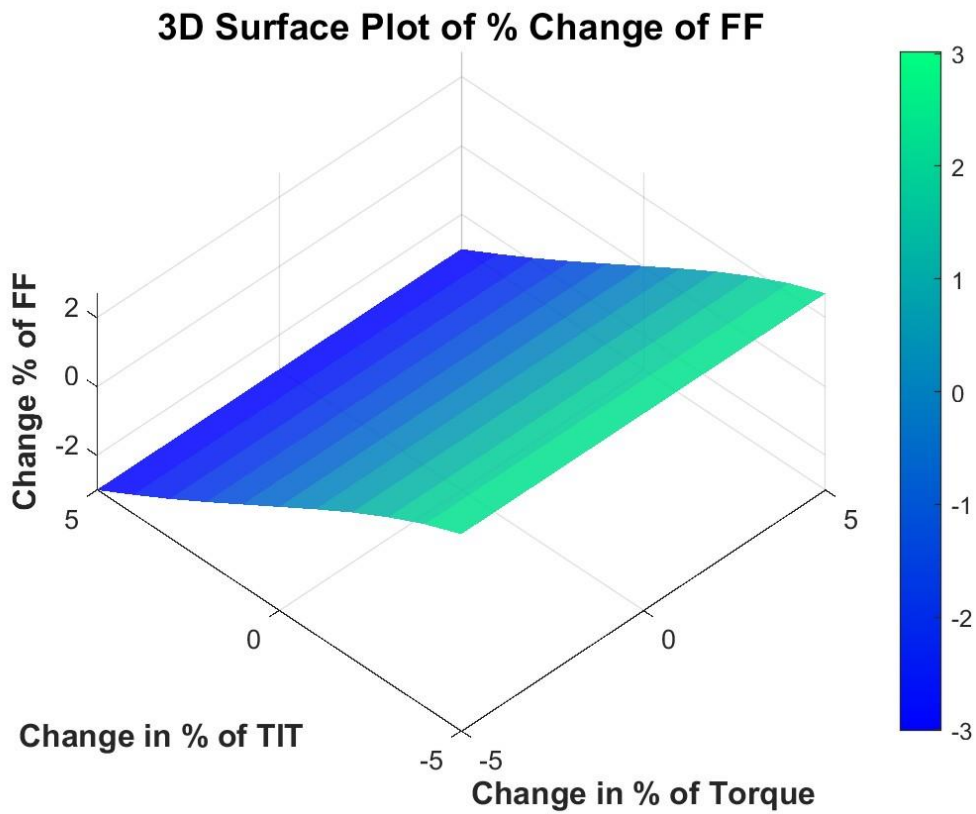
Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των TIT και Ροπής. (α)

Change in % of Torque	Change in % of TIT	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
5,00%	5,00%	-191,18%	-3,01%	-1,14%
4,00%	4,00%	-155,48%	-2,45%	-0,92%
3,00%	3,00%	-118,06%	-1,87%	-0,72%
2,00%	2,00%	-79,14%	-1,26%	-0,48%
1,00%	1,00%	-39,78%	-0,63%	-0,24%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-1,00%	-1,00%	38,92%	0,63%	0,24%
-2,00%	-2,00%	75,70%	1,24%	0,48%
-3,00%	-3,00%	109,25%	1,80%	0,72%
-4,00%	-4,00%	138,06%	2,30%	0,92%
-5,00%	-5,00%	160,22%	2,71%	1,10%

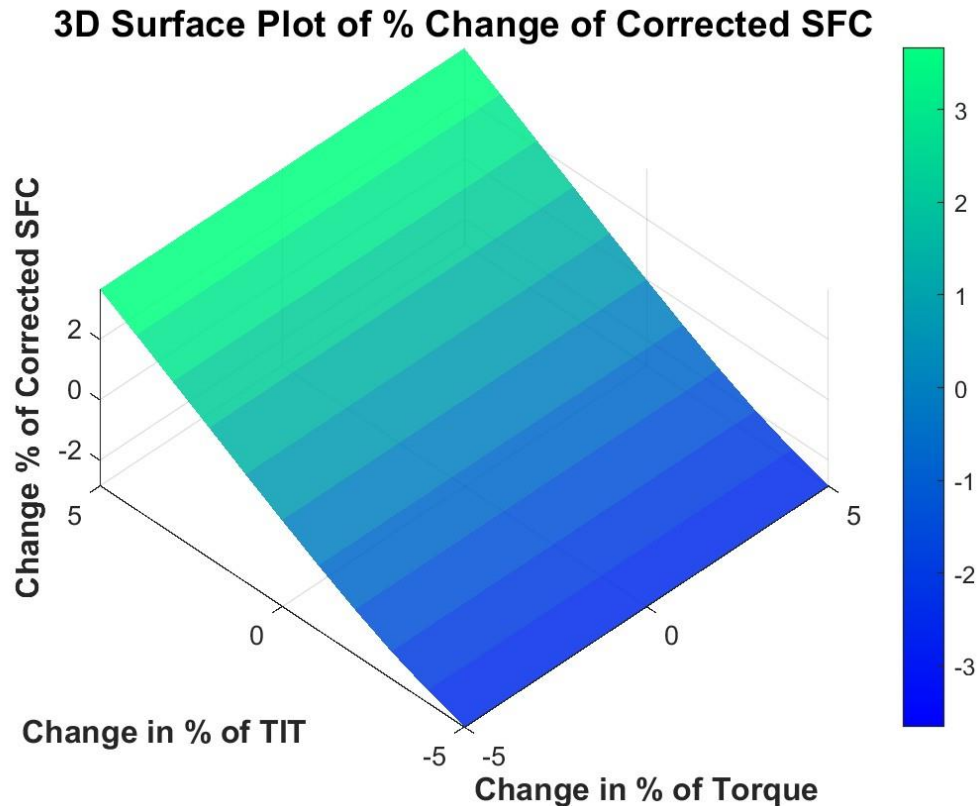
Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των TIT και Ροπής. (β)



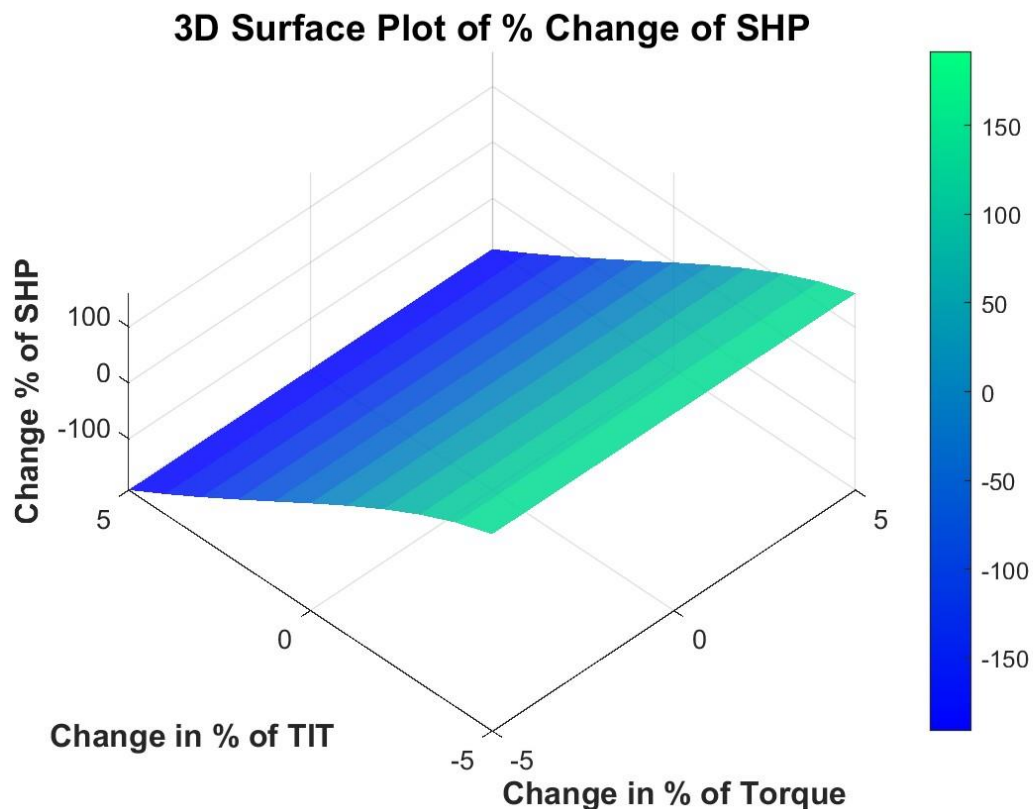
Σχήμα 5.34: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των TIT και Torque, με αύξηση της Torque και ταυτόχρονη μείωση της TIT.



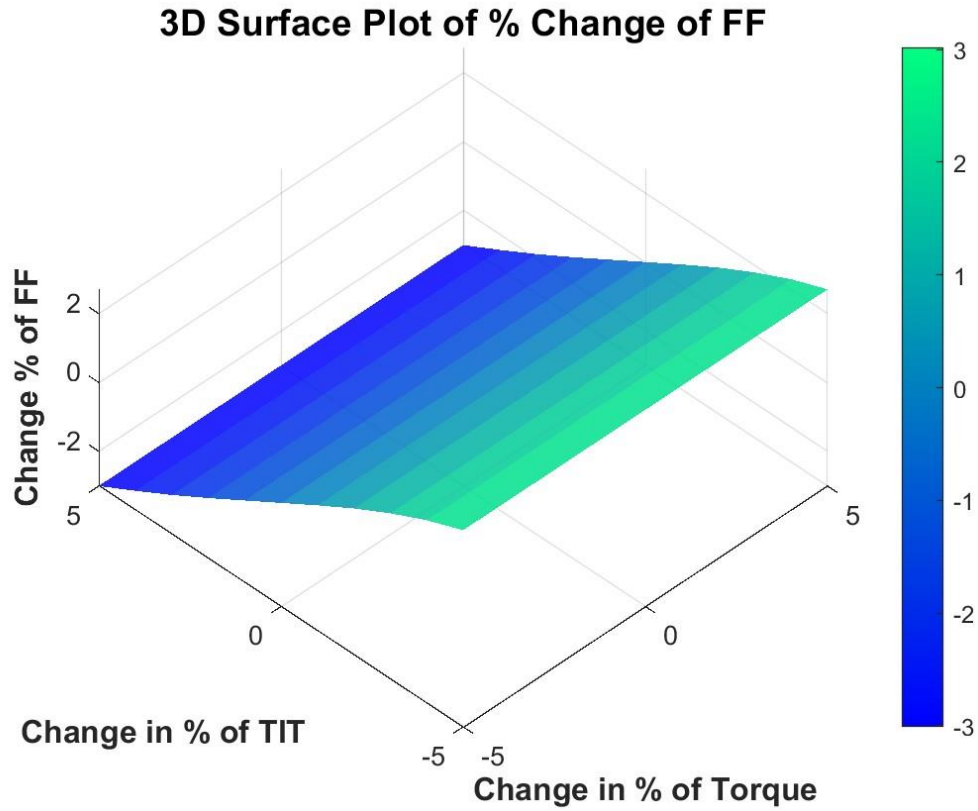
Σχήμα 5.35: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των TIT και Torque, με αύξηση της Torque και ταυτόχρονη μείωση της TIT.



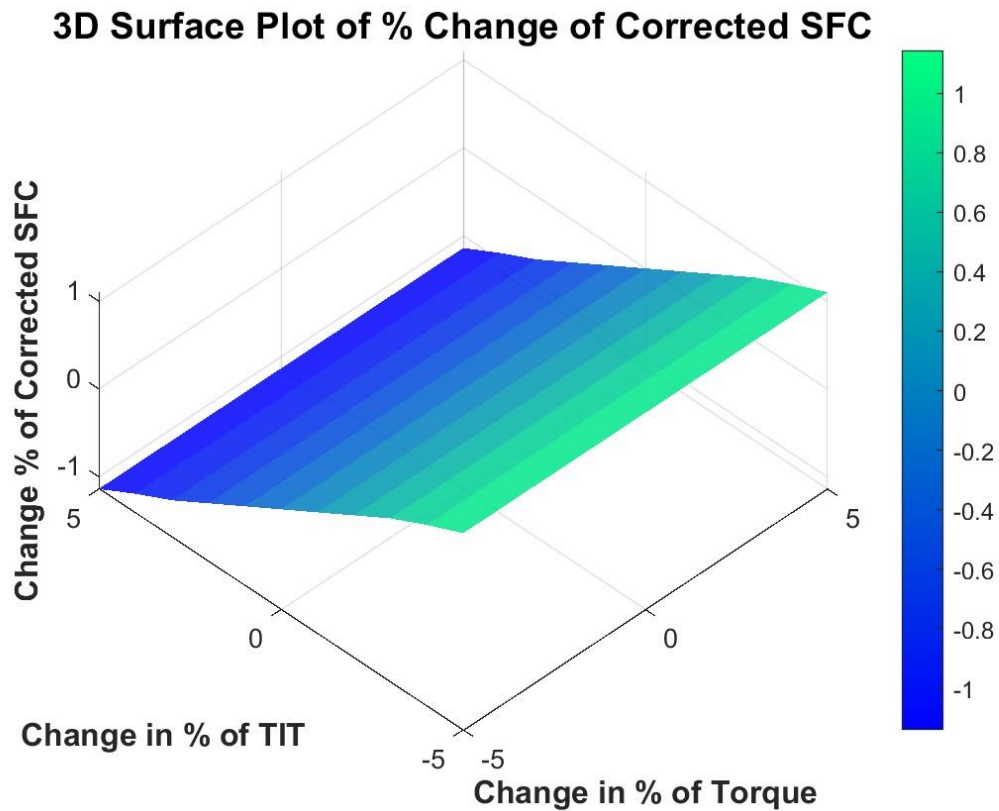
Σχήμα 5.36: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των TIT και Torque, με αύξηση της Torque και ταυτόχρονη μείωση της TIT.



Σχήμα 5.37: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των TIT και Torque, με ταυτόχρονη μείωση της Torque και της TIT.



Σχήμα 5.38: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των TIT και Torque, με ταυτόχρονη μείωση της Torque και της TIT.



Σχήμα 5.39: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των TIT και Torque, με ταυτόχρονη μείωση της Torque και της TIT.

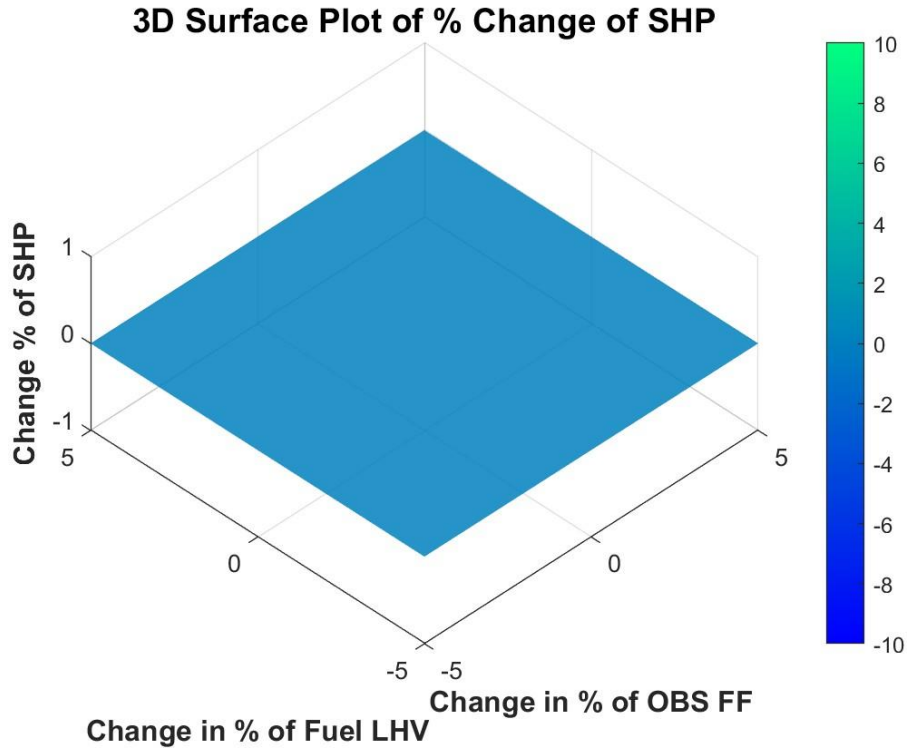
5.2.3. Συνδυασμένη Μεταβολή OSB FF και Κατώτερης Θερμογόνου Δύναμης καυσίμου (Fuel LHV)

Change in % of OBS FF	Change in % of Fuel LHV	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	5,00%	0,00%	-0,12%	-0,13%
-4,00%	4,00%	0,00%	-0,08%	-0,07%
-3,00%	3,00%	0,00%	-0,04%	-0,06%
-2,00%	2,00%	0,00%	-0,02%	-0,02%
-1,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	-1,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2,00%	-2,00%	0,00%	-0,02%	-0,02%
3,00%	-3,00%	0,00%	-0,04%	-0,06%
4,00%	-4,00%	0,00%	-0,08%	-0,07%
5,00%	-5,00%	0,00%	-0,12%	-0,13%

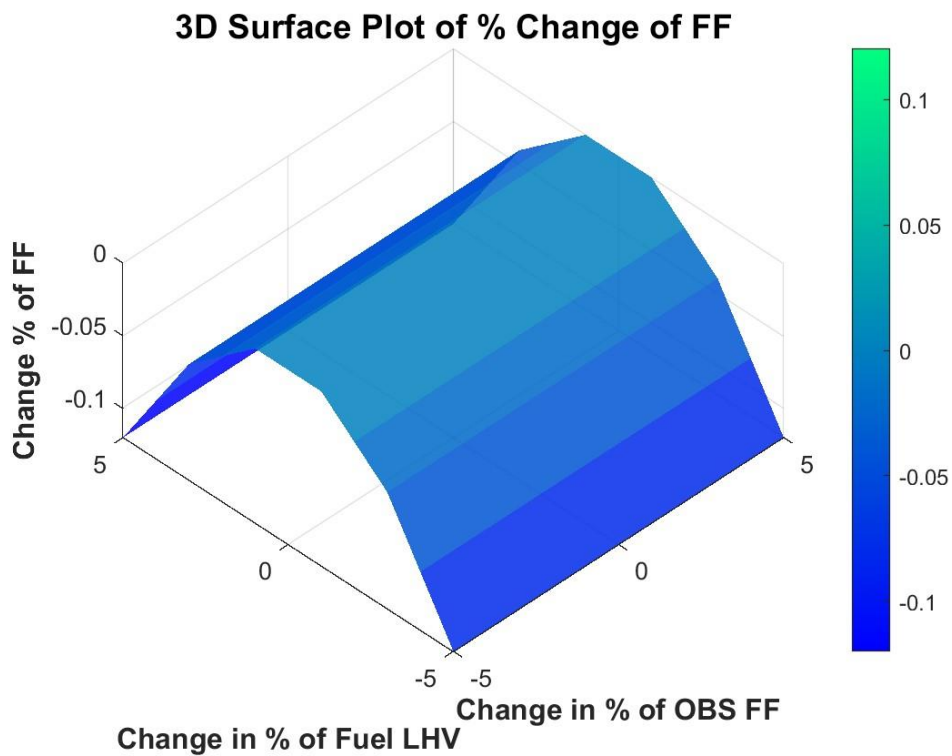
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των OBS FF και Fuel LHV. (α)

Change in % of OBS FF	Change in % of Fuel LHV	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
5,00%	5,00%	0,00%	4,97%	4,96%
4,00%	4,00%	0,00%	3,96%	3,95%
3,00%	3,00%	0,00%	2,56%	2,96%
2,00%	2,00%	0,00%	1,96%	1,95%
1,00%	1,00%	0,00%	0,97%	0,97%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-1,00%	-1,00%	0,00%	-0,96%	-0,97%
-2,00%	-2,00%	0,00%	-1,92%	-1,93%
-3,00%	-3,00%	0,00%	-2,87%	-2,87%
-4,00%	-4,00%	0,00%	-3,80%	-3,80%
-5,00%	-5,00%	0,00%	-4,73%	-4,72%

Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των OBS FF και Fuel LHV. (β)

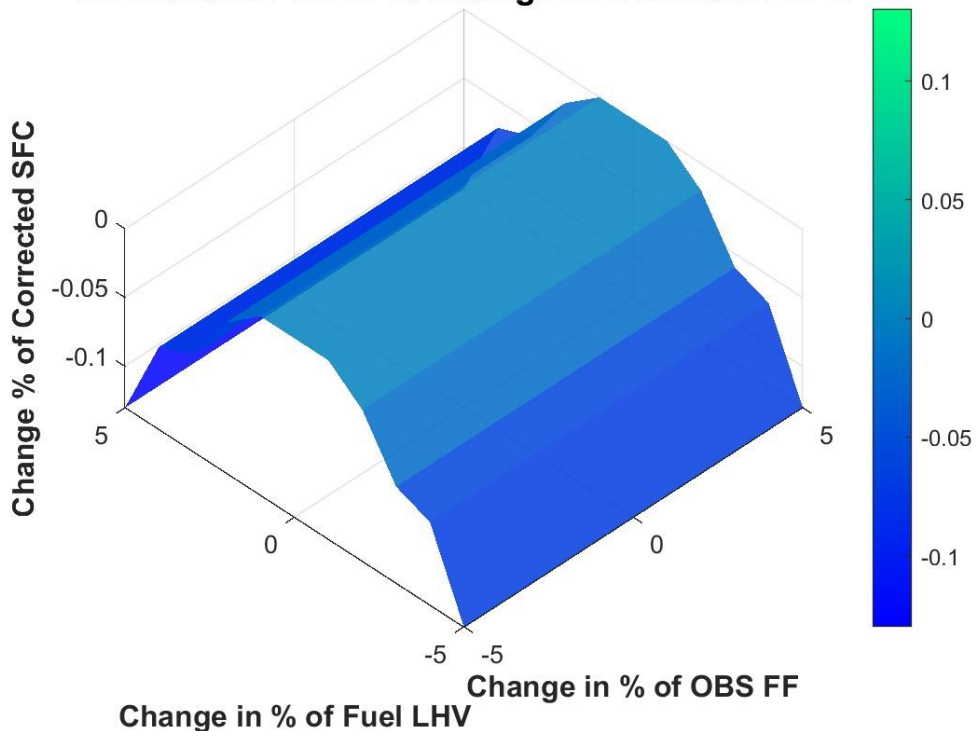


Σχήμα 5.40: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με αύξηση της OBS FF και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.



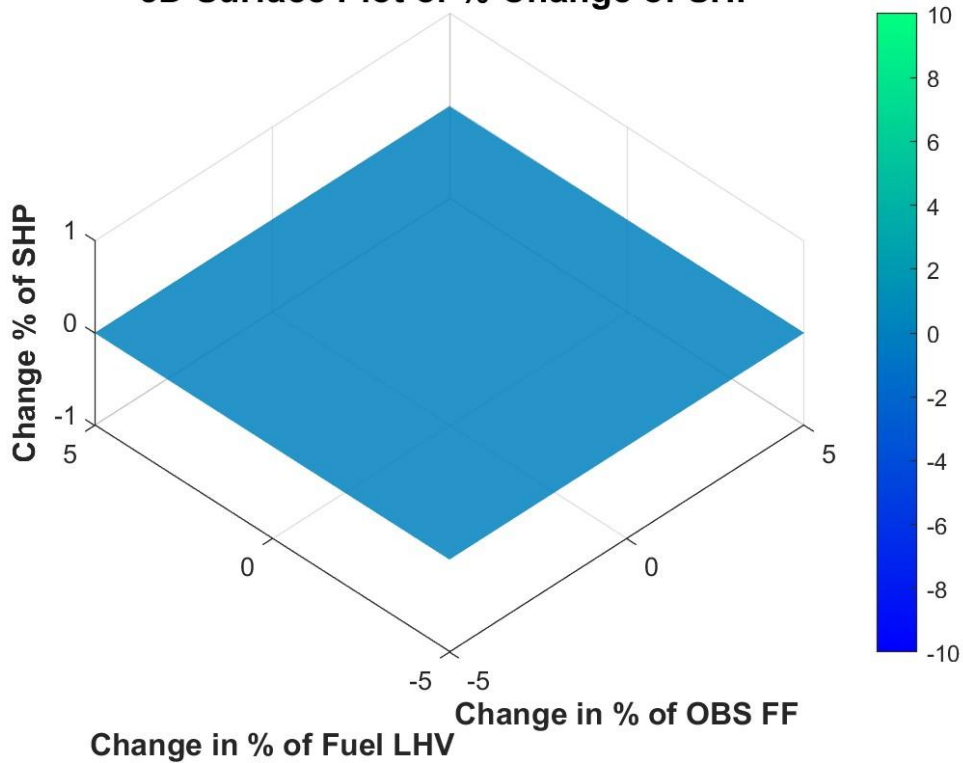
Σχήμα 5.41: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με αύξηση της OBS FF και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.

3D Surface Plot of % Change of Corrected SFC

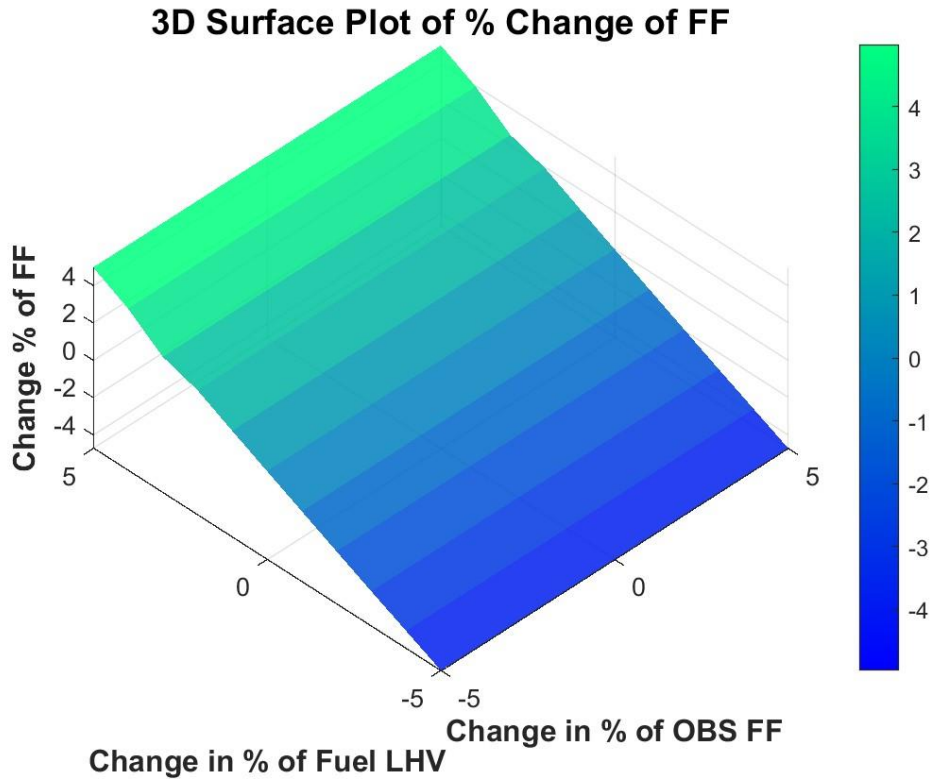


Σχήμα 5.42: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με αύξηση της OBS FF και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.

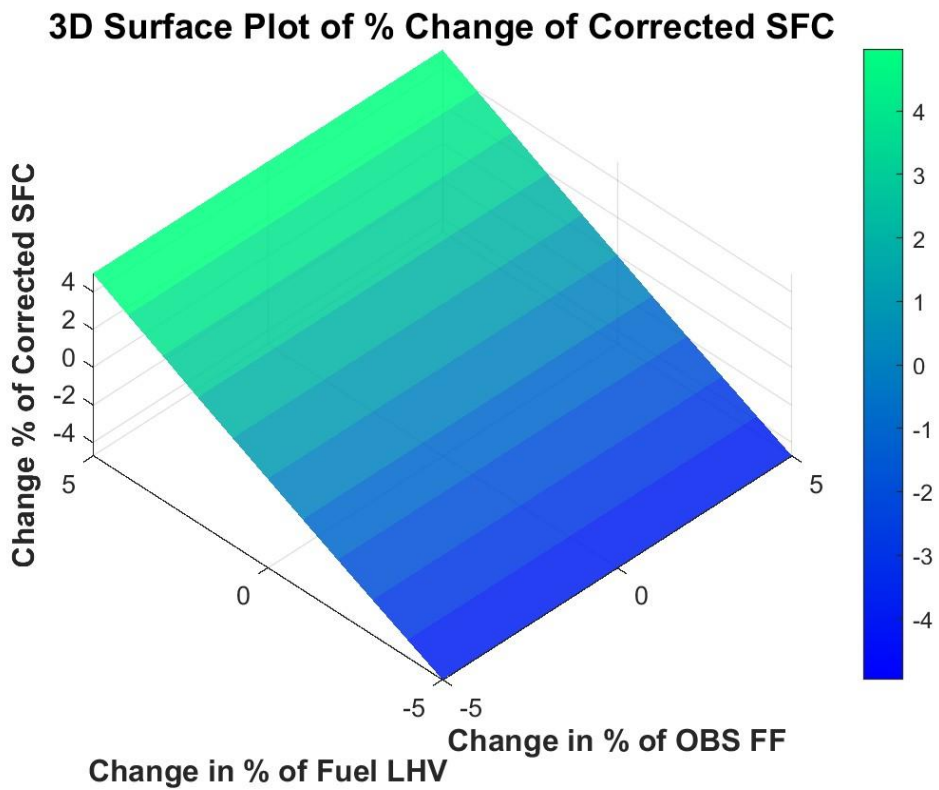
3D Surface Plot of % Change of SHP



Σχήμα 5.43: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της OBS FF και της Fuel LHV.



Σχήμα 5.44: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της OBS FF και της Fuel LHV.



Σχήμα 5.45: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των OBS FF και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της OBS FF και της Fuel LHV.

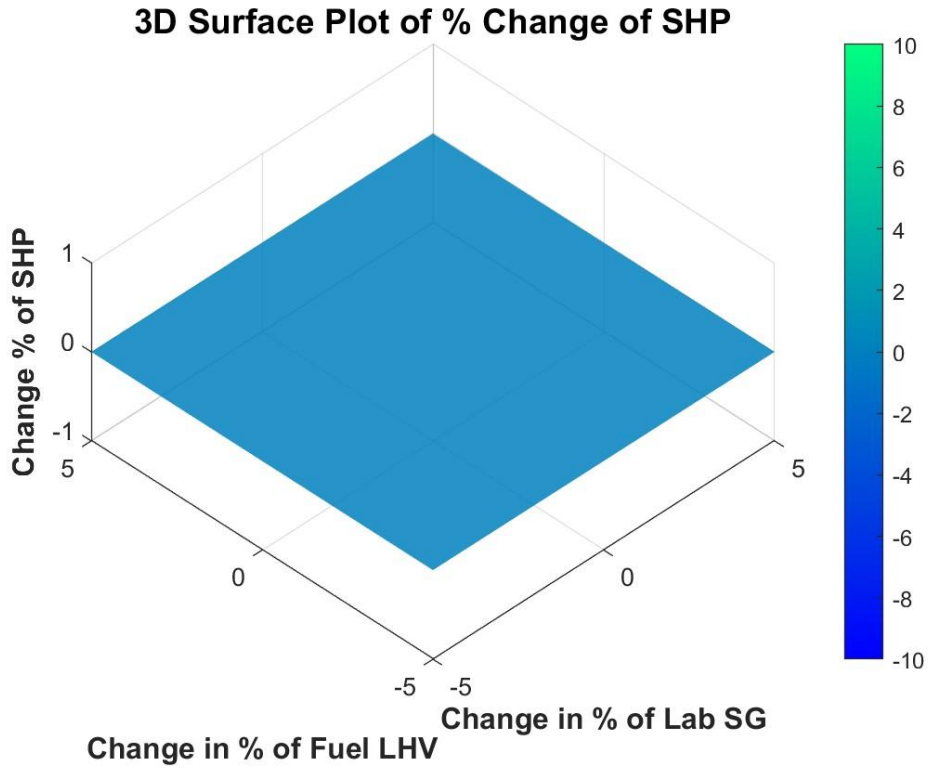
5.2.4. Συνδυασμένη Μεταβολή Ειδικού Βάρους Καυσίμου (Lab SG) και Κατώτερης Θερμογόνου Δύναμης (Fuel LHV)

Change in % of Lab SG	Change in % of Fuel LHV	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
-5,00%	5,00%	0,00%	-2,53%	-2,54%
-4,00%	4,00%	0,00%	-2,49%	-2,50%
-3,00%	3,00%	0,00%	-2,46%	-2,46%
-2,00%	2,00%	0,00%	-2,44%	-2,44%
-1,00%	1,00%	0,00%	-2,43%	-2,43%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1,00%	-1,00%	0,00%	-2,43%	-2,43%
2,00%	-2,00%	0,00%	-2,45%	-2,44%
3,00%	-3,00%	0,00%	-2,47%	-2,48%
4,00%	-4,00%	0,00%	-2,51%	-2,52%
5,00%	-5,00%	0,00%	-2,55%	-2,55%

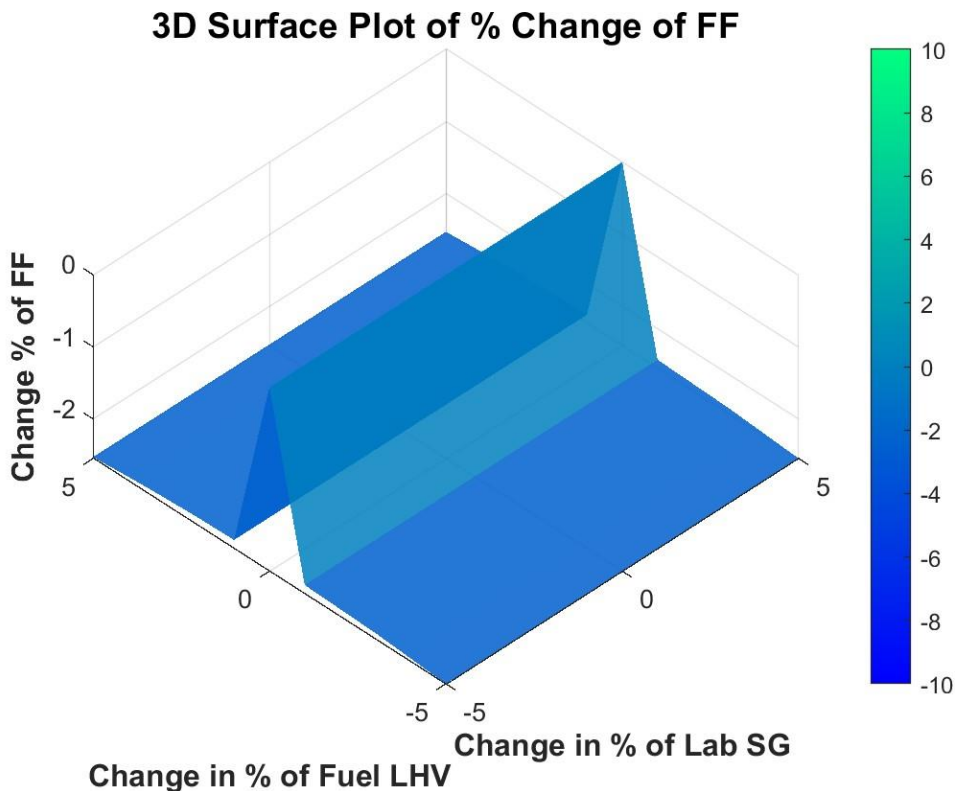
Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των Lab SG και Fuel LHV. (α)

Change in % of Lab SG	Change in % of Fuel LHV	Change % of SHP	Change % of FF	Change % Corrected SFC
5,00%	5,00%	0,00%	2,29%	2,28%
4,00%	4,00%	0,00%	1,33%	1,32%
3,00%	3,00%	0,00%	0,37%	0,37%
2,00%	2,00%	0,00%	-0,57%	-0,57%
1,00%	1,00%	0,00%	-1,50%	-1,51%
0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-1,00%	-1,00%	0,00%	-3,34%	-3,34%
-2,00%	-2,00%	0,00%	-4,24%	-4,24%
-3,00%	-3,00%	0,00%	-5,14%	-5,14%
-4,00%	-4,00%	0,00%	-6,03%	-6,03%
-5,00%	-5,00%	0,00%	-6,90%	-6,91%

Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα της συνδυασμένης ποσοστιαίας μεταβολής 5% της αρχικής τιμής των Lab SG και Fuel LHV. (β)

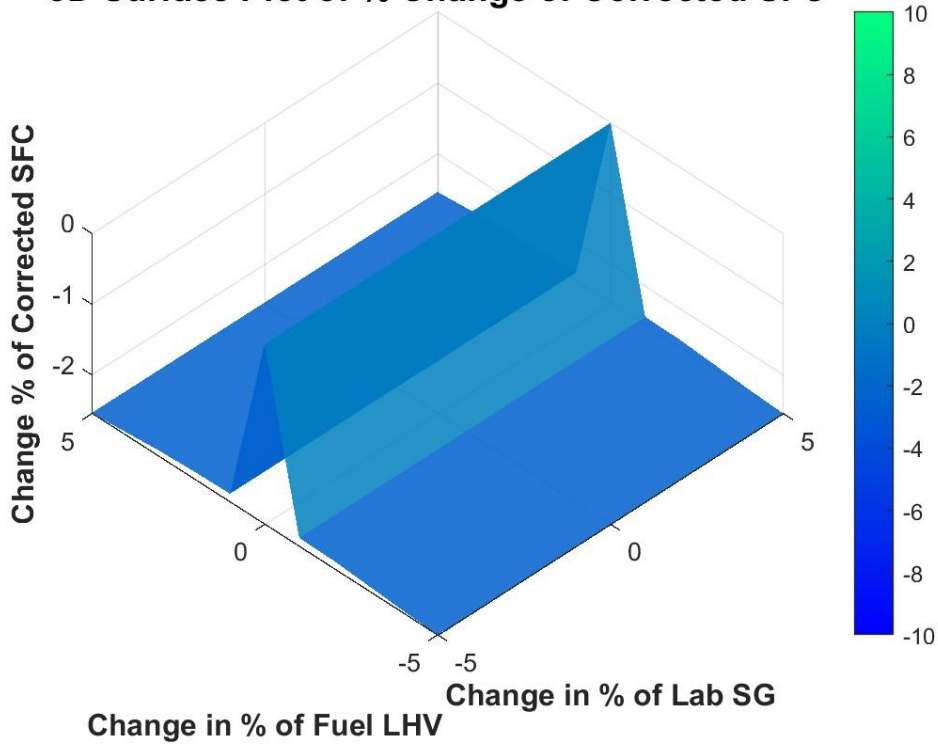


Σχήμα 5.46: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με αύξηση της Lab SG και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.



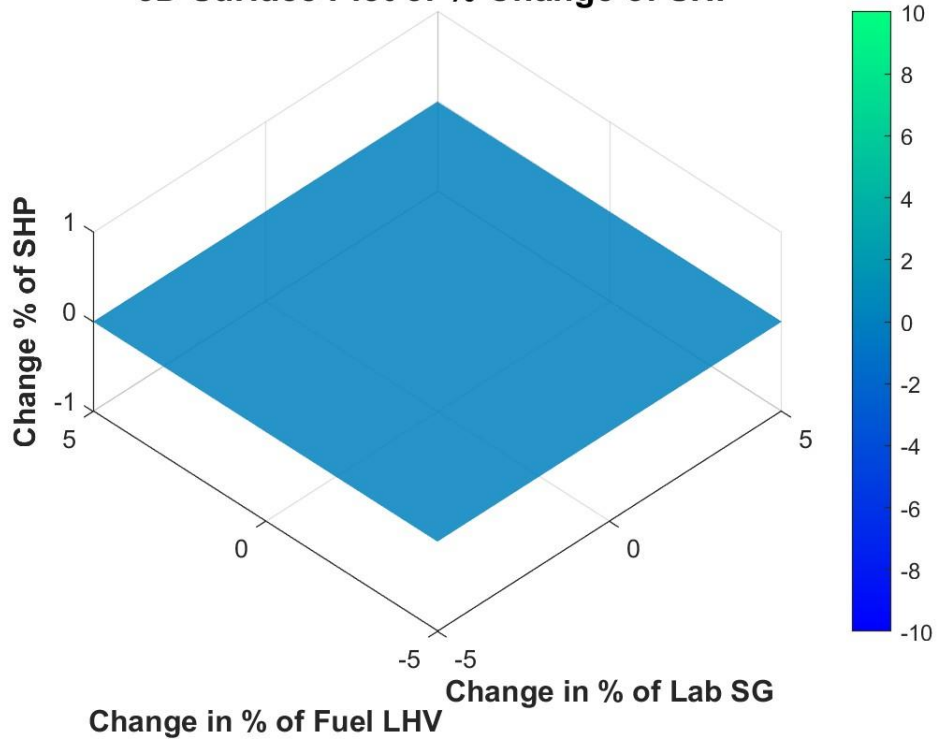
Σχήμα 5.47: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με αύξηση της Lab SG και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.

3D Surface Plot of % Change of Corrected SFC

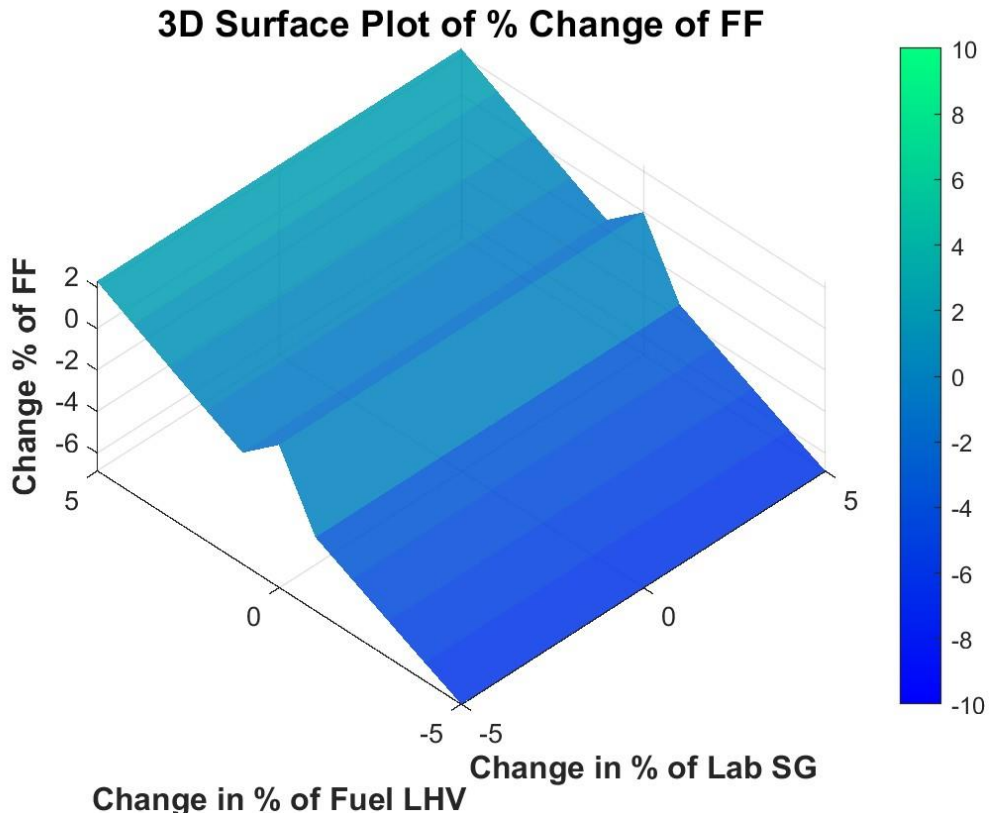


Σχήμα 5.48: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με αύξηση της Lab SG και ταυτόχρονη μείωση της Fuel LHV.

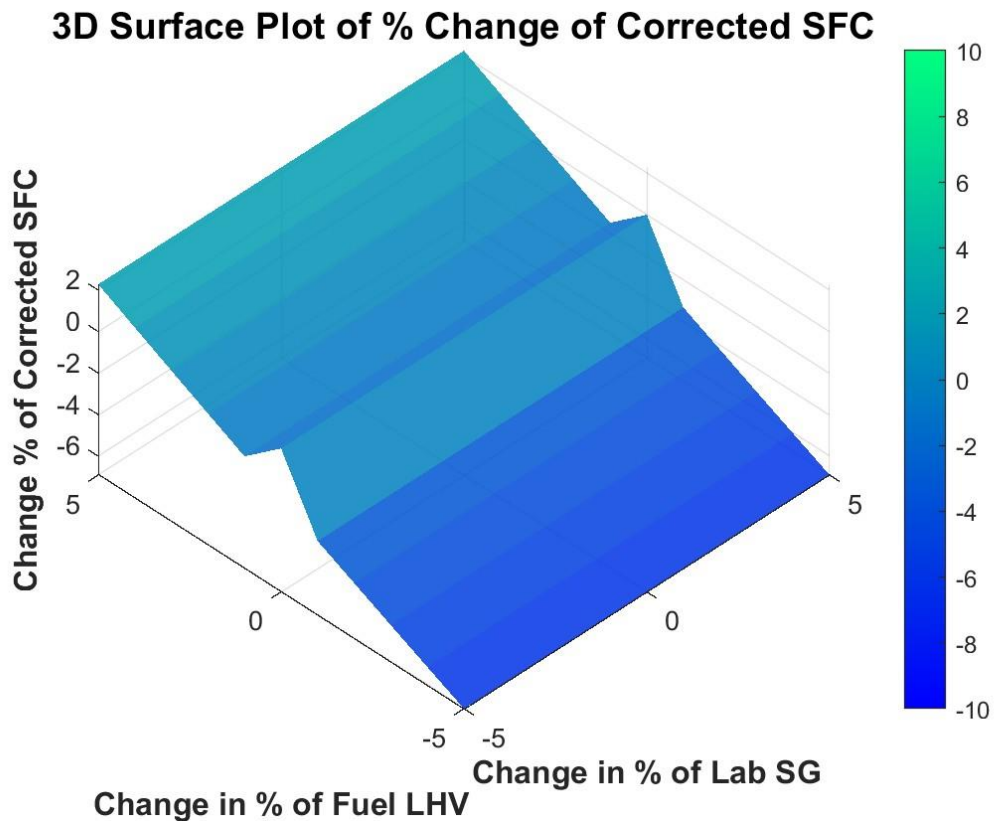
3D Surface Plot of % Change of SHP



Σχήμα 5.49: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SHP συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της Lab SG και της Fuel LHV.



Σχήμα 5.50: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του FF συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της Lab SG και της Fuel LHV.



Σχήμα 5.51: Γραφική 3D απεικόνιση μεταβολής του SFC συναρτήσει των Lab SG και Fuel LHV, με ταυτόχρονη μείωση της Lab SG και της Fuel LHV.

Κεφάλαιο 6: Ανακεφαλαίωση/Συμπεράσματα/Προτάσεις

6.1. Ανακεφαλαίωση

Βασικός πυλώνας της εργασίας που πραγματοποιήθηκε, είναι η ανάπτυξη ενός λογισμικού με τη βοήθεια του εργαλείου App Designer, το οποίο περιλαμβάνεται στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab και το οποίο συμβάλει στη διεξαγωγή της αξιολόγησης των επιδόσεων τριών τύπων της οικογένειας αεροκινητήρων Allison T56. Πιο συγκεκριμένα το λογισμικό είναι σε θέση να διεξάγει το Performance των T56-A-15 (Series IV), T56-A-14 (Series IV) και T56-A-7B (Series II) και να δώσει αποτελέσματα για τις διορθωμένες τιμές της αποδιδόμενης ισχύος (TMHP), της ροής καυσίμου (FF) και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFC). Η ανάλυση συμπληρώνεται με τη δημιουργία κατάλληλων διαγραμμάτων, που αποτυπώνουν τόσο τη γενικότερη κατάσταση του συμπιεστή, όσο και τη συναρτησιακή σχέση των προαναφερθέντων παραμέτρων με τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον στρόβιλο (TIT).

Η απρόσκοπτη διαδικασία του Performance είναι υψίστης σημασίας για την εξαγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων, απαλλαγμένων από την επίδραση των συνθηκών περιβάλλοντος του χώρου της δοκιμής. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επιδρούν καθοριστικά στη γενικότερη συμπεριφορά του κινητήρα. Ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες λόγω μείωσης της πυκνότητάς του αέρα, συνεπάγεται μειωμένες αποδόσεις, ενώ αντίθετα χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος μεταφράζονται ως ενίσχυση της αποδοτικότητας του κινητήρα. Για την προσπέλαση των εμποδίων που εμφανίζονται εξαιτίας της πλάνης που περιβάλλει τις εξαχθείσες μετρήσεις και για να γίνει εφικτή η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων κάθε δοκιμής, είναι επιτακτική η ανάγκη αναγωγή τους σε συνθήκες τυπικής μέρας. Πιο συγκεκριμένα, θερμοκρασία αέρα 15°C, πίεση 101,325Pa και 0% σχετική υγρασία (NACA Technical Note 3182, 1954).

Ο εκάστοτε κατασκευαστής έχει φροντίσει στη βιβλιογραφία, δηλαδή στο τεχνικό εγχειρίδιο που συνοδεύει τον κινητήρα, την ύπαρξη κατάλληλων διορθωτικών εξισώσεων, οι οποίες αν τροφοδοτηθούν με τα δεδομένα των δοκιμών, θα αποδώσουν διορθωμένες τις τρεις τιμές ενδιαφέροντος: τη διορθωμένη ιπποδύναμη άξονα (Corrected TMHP), τη διορθωμένη ροή καυσίμου (Corrected FF) και τέλος τη διορθωμένη ειδική κατανάλωση καυσίμου (Corrected SFC). Τα διορθωμένα αποτελέσματα συμπληρώνονται από τα απαραίτητα διαγράμματα των προαναφερθέντων τιμών συναρτήσεως της θερμοκρασίας εισόδου του αέρα στον στρόβιλο γνωστή και ως TIT καθώς και από ένα επιπλέον διάγραμμα που απεικονίζει την υγεία του συμπιεστή.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε όπως τονίστηκε είναι σε θέση να διεξάγει αποτελεσματικά το performance τριών τύπων ελικοστρόβιλου κινητήρα. Χάριν διευκόλυνσης της παρουσίασης και της επίδειξης των δυνατοτήτων του, χρησιμοποιήθηκε σαν παράδειγμα ο A/K T56-A-15. Πρόκειται για έναν ελικοστρόβιλο κινητήρα (turboprop) με μακρά ιστορία στον χώρο της αεροπλοΐας, ο οποίος συναντάται στον μεταγωγικό αεροσκάφος Lockheed C-130H Hercules. Ένας αξονικός

συμπιεστής δεκατεσσάρων βαθμίδων με λόγο συμπίεσης 9.5:1, έξι θάλαμοι καύσης τοποθετημένοι περιμετρικά του άξονά του, ένας στρόβιλος τεσσάρων βαθμίδων και ένα κιβώτιο ταχυτήτων λόγου μετάδοσης ίσο με 13.54:1 με δυνατότητα μείωσης των σταθερών 13,820 rpm του power section σε ένα αποδεκτό αριθμό στροφών για την αποδοτική λειτουργία της έλικας, απαρτίζουν τα βασικά τμήματα του παραπάνω κινητήρα. Το λογισμικό, ταυτοποιήθηκε με το ήδη υπάρχον στις εγκαταστάσεις της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας και η ταύτιση των αποτελεσμάτων αποδείχθηκε άριστη. Οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάστηκαν σε ποσοστό χαμηλότερο του 1%, οφείλονται στον τρόπο επεξεργασίας και στρογγυλοποίησης των τιμών των δύο προγραμμάτων.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας σε όλες τις παραμέτρους που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη δοκιμή. Η διακύμανση του εύρους των τιμών με την αυξομείωση της αρχικής τιμής τους σε ποσοστό 5%, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ποικίλων χρήσιμων διαγραμμάτων. Η παραμετρική ανάλυση, είτε για σκοπούς μελέτης, είτε λόγω βλάβης κάποιου αισθητήρα ανέδειξε το πόσο επιρρεπείς ή μη στις μεταβολές αυτές, είναι οι διορθωμένες τιμές των TMHP/SHP, FF και SFC.

Από μαθηματικής σκοπιάς, η διόρθωση των τιμών γίνεται μέσω γραμμικής παρεμβολής. Ακόμα κι αν για οποιαδήποτε αιτία δεν επιτευχθούν για παράδειγμα οι επιθυμητοί 1077°C και έστω ότι η τιμή της TIT στη φάση του Take-off είναι διαφορετική της απαιτούμενης, εξασφαλίζεται η εγκυρότητα των τελικών επιδόσεων. Ο κώδικας θα εκτελέσει μια πρωταρχική διόρθωση, είτε πρόκειται για τη διόρθωση της τιμής του TMHP, είτε για τη διόρθωση του FF, εκτελώντας γραμμική παρεμβολή με τη βοήθεια ενός πίνακα που περιλαμβάνει χαρακτηριστικές τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος συναρτήσει των τεσσάρων χαρακτηριστικών τιμών της TIT που αναγράφονται στην T.O..

Αφότου υπολογιστούν οι απαραίτητες διορθωμένες τιμές βάσει συνθηκών ημέρας θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μιας καμπύλης (Curve), η οποία περιγράφει τη διόρθωση είτε της αποδιδόμενης ισχύος (TMHP) είτε της ροής καυσίμου (SFC), σε σχέση με τη θερμοκρασία εισόδου του αέρα στην τουρμπίνα (TIT).

Τα τελικά αποτελέσματα θα εξαχθούν συνδυαστικά κάνοντας αντιστοίχιση της τιμής αναφοράς των 1077°C πάνω σε αυτήν τη νέα καμπύλη και αξιοποιώντας της διορθωτικές εξισώσεις. Με αυτόν τον τρόπο ακόμα και αν οι observed τιμές δεν συμφωνούν με την τιμή αναφοράς, η διόρθωσή τους θα επιφέρει αποτελέσματα τα οποία έρχονται σε πλήρη ταύτιση με τη συμπεριφορά που παρατηρείται στους 1077°C.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία, καταδεικνύεται μεγάλη ευαισθησία στις τιμές της αποδιδόμενης ισχύος με διαφοροποιήσεις μεγαλύτερες του 400% σε ορισμένες περιπτώσεις. Σχεδόν όλα τα μεγέθη που έλαβαν μέρος στην ανάλυση, είχαν έντονη επίδραση στην εξέλιξη της συμπεριφοράς του Corrected SHP.

Στην αντίπερα όχθη, βρίσκονται οι τιμές των Corrected FF και SFC, παρουσιάζοντας ελάχιστη ευαισθησία στο σύνολο των μεταβολών που τους επιβλήθηκαν.

6.2. Συμπεράσματα

Η σπουδαιότητα διόρθωσης των επιδόσεων ενός A/K είναι πλέον αναμφισβήτητη. Δεν μπορεί να γίνει συζήτηση αξιολόγησης των τελικών επιδόσεων αν πρώτα δεν έχει γίνει η αναγωγή τους σε συνθήκες τυπικής μέρας. Η διόρθωση αυτή παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης των τιμών, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του αεριοστρόβιλου.

Η πυκνότητα του εισερχομένου αέρα στο εσωτερικό του κινητήρα, είναι από τις βασικές παραμέτρους στα τελικά αποτελέσματα. Αέρας που χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα, με δεδομένο σταθερό όγκο V, συνεπάγεται αύξηση της ποσότητας της μάζας αέρα που θα εισέλθει στο σώμα του A/K και κατ' επέκταση τη βελτίωση της αποδιδόμενης ιπποδύναμης. Υψηλές τιμές πυκνότητας εντοπίζονται σε χώρους με χαμηλές επικρατούσες θερμοκρασίες, ενώ αντίθετα χαμηλή πυκνότητα αέρα παρατηρείται τις πιο ζεστές μέρες.

Ακόμα ένα μέγεθος ζωτικής σημασίας είναι και η βαρομετρική πίεση. Υψηλή βαρομετρική παρουσιάζεται σε χαμηλό υψόμετρο, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη πυκνότητα αέρα, ενώ χαμηλή βαρομετρική, συναντάται σε μεγάλο υψόμετρο καταδεικνύοντας χαμηλότερα επίπεδα πυκνότητας. Αλλαγές στην βαρομετρική πίεση οφείλονται και στις εκάστοτε καιρικές συνθήκες χάριν εμφανιζόμενων συστημάτων κακοκαιρίας.

Πέραν των όσων έχουν αναφερθεί ανωτέρω, υψίστης σημασίας για την ομαλή διεξαγωγή του Performance και εντέλει της εγκυρότητάς των αποτελεσμάτων, είναι φυσικά η ορθή λειτουργία του συνόλου του εξοπλισμού του Δοκιμαστηρίου. Η άριστη συνεργασία πλειάδας εξαρτημάτων είναι αυτή που θα εγγυηθεί για τις εξαγόμενες μετρήσεις. Η σωστή λειτουργία των αισθητήρων μέτρησης τιμών πιέσεων, θερμοκρασιών, ροών αέρα, ελαίου, καυσίμου, στροφών και ροπών στις τέσσερις φάσεις της δοκιμής, η μεταφορά των σημάτων στην κονσόλα δοκιμών και η σωστή ανάγνωσή τους από τους χειριστές αποτελεί τον πυρήνα μιας απρόσκοπτης διαδικασίας ελέγχου. Αυτό φυσικά προϋποθέτει τη σωστή τοποθέτηση του εξοπλισμού πάνω στο σώμα του κινητήρα, ακολουθώντας κατά γράμμα τις οδηγίες της βιβλιογραφίας, που με τη σειρά του απαιτεί την παροχή κατάλληλης εκπαίδευσης του τεχνικού προσωπικού. Για παράδειγμα ο τρόπος τοποθέτησης ενός αισθητήρα, η τιμή της ροπής που θα εφαρμοστεί για το σφίξιμο ενός κοχλίου, διαδραματίζει τεράστιο ρόλο στην επερχόμενη δοκιμή. Αν η εφαρμοζόμενη ροπή είναι περισσότερη, ενδέχεται ο κοχλίας να σπάσει τραυματίζοντας το σώμα του A/K, ενώ αν είναι λιγότερη, η πιθανότητα να ξεβιδωθεί πλήρως λόγω αναπτυσσόμενων κραδασμών, είναι μεγάλη. Όλες οι διαδικασίες που σχετίζονται με τη διαχείριση αεροπορικού υλικού, είτε πρόκειται για έναν φαινομενικά απλό κοχλίο, είτε για έναν πολύ μικρών διαστάσεων ελαστικό σύνδεσμο, τη γνωστή στην τεχνική ορολογία τσιμούχα, είτε πρόκειται για τον ίδιο τον κινητήρα, είναι εξαιρετικά ακριβείς και δεν επιδέχονται καμίας αλλαγής ή αυτοσχεδιασμού, καθότι στο τέλος το αντίκτυπο της τήρησης ή μη όλων των κανόνων αφορά την ανθρώπινη ζωή.

Αυτός ήταν και ο κύριος στόχος της διεξαγωγής της ανάλυσης ευαισθησίας που έλαβε χώρα στο Κεφάλαιο 5. Η ένταση της επιρροής της εισχώρησης λανθασμένων

τιμών στον αλγόριθμο, στα μεγέθη επιδόσεων. Η ανάλυση κατέδειξε την τεράστια ευαισθησία ενός μόνο μεγέθους, της διορθωμένης τιμής του TMHP, καθώς τα εναπομείναντα δυο, οι διορθωμένες τιμές της ροής καυσίμου (Corrected FF) και της ειδικής κατανάλωσης (Corrected SFC) δεν παρουσίασαν αξιοσημείωτη μεταβολή. Υπήρξαν ωστόσο διαφοροποιήσεις των μεγεθών τους, αλλά σε κανένα από τα σενάρια που αναπτύχθηκαν, δεν ξεπεράστηκε το ποσοστό του 5% της μεταβολής τους από την τιμή αναφοράς.

6.3. Προτάσεις

Με γνώμονα όσα αναπτύχθηκαν, μπορούν να αναφερθούν τα κάτωθι:

- Περαιτέρω βελτιστοποίηση του λογισμικού για την παροχή περισσότερων διαδικασιών, όπως την αυτόματη συμπλήρωση του Test Log του κινητήρα, παρακάμπτοντας έτσι την χειρόγραφη μεταφορά των μετρήσεων στα ειδικά έντυπα εξοικονομώντας χρόνο.
- Δυνατότητα δημιουργίας ηλεκτρονικής βιβλιοθήκης/βάσης δεδομένων, με καταχωρημένες όλες τις δοκιμές κάθε τύπου A/K συνοδευόμενες από λεπτομερή αναφορά των ενεργειών που έχουν λάβει χώρα από τη στιγμή της παραλαβής του μέχρι την στιγμή παράδοσής του στον πελάτη. Έτσι, πληκτρολογώντας απλά το κατάλληλο Serial Number ο χρήστης θα έχει στη διάθεσή του όλο τον όγκο πληροφοριών που χρειάζεται οποιαδήποτε στιγμή. Ακόμη, η ύπαρξη τέτοιας βάσης δεδομένων θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την παρακολούθηση της υγείας κάθε κινητήρα αξιοποιώντας μετρήσεις κατά την πτήση που θα συλλέγονται από το πλήρωμα. Αυτό δίνει τη δυνατότητα του εντοπισμού μείωσης των επιδόσεων πέραν του φυσιολογικού ρυθμού, πράγμα που θα καταδείκνυε εν εξελίξει βλάβη.
- Η ενσωμάτωση ενός συστήματος οδηγιών, όπως αυτές αναγράφονται στη βιβλιογραφία για την προετοιμασία του κινητήρα, θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντικό μελλοντικό βήμα με σκοπό την εξέλιξη και την αναβάθμιση συνολικά της διάταξης. Κάθε βήμα της διαδικασίας θα εμφανίζεται αναλυτικά στην οθόνη και ο χειριστής θα απαιτείται να επιβεβαιώσει την ολοκλήρωσή του πριν προχωρήσει στο επόμενο, μέσω μιας επιλογής επιβεβαίωσης (τικάρισμα). Αυτή η διαδικασία θα ενισχύσει την τήρηση των βιβλιογραφικά καταγεγραμμένων βημάτων, μειώνοντας το περιθώριο ανθρώπινου λάθους, αυξάνοντας την ασφάλεια τόσο των χειριστών όσο και της ίδιας της μηχανής κατά την εκτέλεση του performance. Αποτελεί αναμφίβολα μία ζωτικής σημασίας δικλείδα ασφαλείας, ιδιαίτερα για νέους χειριστές, οι οποίοι εφόσον έχουν εξοικειωθεί με την ερμηνεία της T.O., θα τους παρέχονται εκ νέου όλα τα βήματα εξασφαλίζοντας την συστηματική και ακριβή εκτέλεσή τους.
- Τέλος, μια επιπρόσθετη ωφέλιμη ενέργεια η οποία θα παρείχε επιπλέον πληροφορίες για τη συνολική εικόνα του κινητήρα θα ήταν το integration με ένα

άλλο διαφορετικό λογισμικό, το οποίο θα παρέχει την δυνατότητα της διάγνωσης βλαβών συνιστωσών του κινητήρα σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα και με χρήση μοντέλου προσομοίωσης λειτουργίας του κινητήρα. Με άλλα λόγια το integration ή αλλιώς ενσωμάτωση, αναφέρεται στη διαδικασία συνδυασμού και συγχρονισμού δύο ή περισσότερων διαφορετικών λογισμικών, ώστε να λειτουργούν με αρμονικότητα, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση και την επικοινωνία μεταξύ τους με σκοπό την ενίσχυση της αποδοτικότητας όλου του συστήματος.

Βιβλιογραφία

- Air Force Petroleum Office. (1992, January 29). MILITARY SPECIFICSTION TURBINE FUELS, AVIATION, KEROSENE TYPES, NATO F-34 (JP-8) AND NATO F-35. Ανάκτηση από <https://quicksearch.dla.mil/Transient/3BB0D138D8F84C169A7CC38AB1E7E16C.pdf>
- Alexander D. Baxter, Fredric F.Ehrich - Britannica. (2024, September 6). *Turboprops, propfans, and unducted fan engines*. Ανάκτηση από Britannica: <https://www.britannica.com/technology/jet-engine/Turboprops-propfans-and-ducted-fan-engines>
- Baehr, H. D. (2001). *Θερμοδυναμική: Εισαγωγή στα Θεμελιώδη και στις Τεχνικές*. Θεσσαλονίκη: Απόδοση στην Ελληνική Γλώσσα, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.
- DEPARTMENT OF NATIONAL DEFENCE CANADA. (1996, November). T56 PROPULSION SYSTEM COST STUDY . (R. R. K. M. Jaansalu, Συντάκτης) 1133 Sheppard Avenue West, PO Box 2000, North York, Ontario, Canada M3M 3B9 , CANADA. Ανάκτηση από <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA321546.pdf>
- EPA-United States Environmental Protection Agency. (1971, September). Final Technical Report Collection and Assessment of Aircraft Emissions Base-Line Data: Turbo-prop Engines (Allison T56-A-15). (W. M. J. M. Vaught, Συντάκτης) Indianapolis, Indiana: National Service Center for Environmental Publications (NSCEP). Ανάκτηση από <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/91000EYQ.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=Prior%20to%201976&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQField>
- Federal Aviation Administration. (χ.χ.). Ανάκτηση από https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/13_phak_ch11.pdf
- Fritsche, M. E. (2024). Analytical and numerical analysis of the De Haller criterion for low-pressure axial fans', Proceedings of the ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New Orleans, USA, October 29–November 2, 2023. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1115/IMECE2023-113304>
- GENERAL ELECTRIC. (χ.χ.). GE Aerospace. Ανάκτηση από J79 Turbojet Engines: <https://www.geaerospace.com/sites/default/files/datasheet-J79.pdf>
- Gordon C. Oates, (. (1985). *Aerothermodynamics of Aircraft Engine Components*. AIAA Education Series.
- International Organisation for. (1975). ISO Standard Atmosphere, ISO 2533. Geneva. Ανάκτηση από <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/7472/c203e9121d4c40e5bdc98844b1a1e2f4/ISO-2533-1975.pdf>
- Kurt Seldner, J. R. (February 1972). *Generalized Simulation*. Lewis Research Center, Cleveland: NASA Technical Note D-6610.
- L.A. Times Archives. (1994, November 22). Rolls-Royce Plans to Buy Rival Jet Engine Maker Allison. *Los Angeles Times*. Ανάκτηση από <https://www.latimes.com/archives/la-xpm-1994-11-22-fi-252-story.html>

- Lockheed Martin. (χ.χ.). <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/c130/history.html>.
- LOCKHEED MARTIN. (χ.χ.). *LOCKHEED MARTIN, Hercules History*. Ανάκτηση από <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/c130/history.html>
- Middle East Propulsion Company Ltd. (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://mepcsa.com/pages/product-service/>
- MTU Aero Engines. (2024, June). *AERO REPORT The aviation magazine of MTU Aero Engines*. Ανάκτηση από MTU Aero Engines: <https://aeroreport.de/en/good-to-know/how-does-a-turbojet-engine-work>
- NACA Technical Note 3182. (1954, May). Manual of the ICAO Standard Atmosphere - Calculations by the NACA. Langley Aeronautical Laboratory, Langley Field. Ανάκτηση από <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930083952>
- NACA Technical Report 1235. (1955). Standard Atmosphere - Tables And Data for Altitudes to 65800 Feet. Langley Aeronautical Laboratory, Langley Field. Ανάκτηση από <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA278141.pdf>
- NASA. (2024). Propeller Thrust. Ανάκτηση από <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/proph.html>
- NASA. (2024). Thrust Specific Fuel Consumption. Ανάκτηση από <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/sfc.html>
- NASA. (2024). Turboprop Thrust. Ανάκτηση από <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/turbprp.html>
- National Air and Space Museum. (χ.χ.). *Smithsonian*. Ανάκτηση από https://www.si.edu/object/lycoming-t53-l-1-ltc1b-1-turboshaft-engine%3Anasm_A19620117000.
- National and Air Space Museum Smithsonian. (χ.χ.). Pratt & Whitney Canada PW123 Turboprop Engine. Ανάκτηση από https://airandspace.si.edu/collection-objects/pratt-whitney-canada-pw123-turboprop-engine/nasm_A19900255000
- NATO. (χ.χ.). Advancements in Canadian Forces T56 Engine Interactive Electronic Technical Manuals (IETM). (C. C. Lieutenant Colonel R. B. Cooke, Επιμ.) Ανάκτηση από <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/RTO-MP-AVT-157/MP-AVT-157-21.pdf>
- oases. (2023, March 17). Harvesting and utilising the vast amounts of data produced by modern aircraft - Part 1. (T. Hedges, Συντάκτης) Ανάκτηση από <https://www.oases.aero/blog/harvesting-and-utilising-the-vast-amounts-of-data-produced-by-modern-aircraft-part-1/>
- Philip P. Walsh, P. F. (1998). *Gas Turbine Performance*. Oxford: First Edition,.
- Pratt & Whitney. (χ.χ.). Pratt & Whitney An RTX Business. Ανάκτηση από TF33 Engine: <https://www.prattwhitney.com/en/products/military-engines/tf33>
- Pratt & Whitney. (χ.χ.). Pratt & Whitney An RTX Business. Ανάκτηση από PT6T Engine: <https://www.prattwhitney.com/en/products/helicopter-engines/pt6t>

- Pratt & Whitney. (χ.χ.). Pratt & Whitney An RTX Business. Ανάκτηση από PW100/150 Engines: <https://www.prattwhitney.com/en/products/regional-aviation-engines/pw100-150>
- R.J. List, (. (1963). Smithsonian Meteorological Tables. *Sixth Revised Edition*. Washington, D.C. Ανάκτηση από <http://fisicaatmo.at.fcen.uba.ar/practicas/cu31924002999831.pdf>
- Rolls Royce. (2001). TURBOPROP ENGINE T-56 SERIES. Ανάκτηση από <https://shop.boeing.com/medias/0282.pdf?context=bWFzdGVyfHBkZnwxMDc3Mzc5fGFwcGxpY2F0aW9uL3BkZnxxwZGYvaGE5L2gzMC84ODE0MDcxNTQ1ODg2LnBkZnxxhMDdiN2Q4M2FIYWVhNzcxY2M4YzZMwMjBkYmE5NjQ0N2UyNDU0YzA0YzY0NDQ4OWNiNTZmY2QzNDNhZmVjMjQ3&attachment=true>
- Sakhrieh, A. (2019, March 5). THE ADIABATIC FLAME TEMPERATURE AND LAMINAR FLAME SPEED OF METHANE PREMIXED FLAMES AT VARYING PRESSURES. Ανάκτηση από https://proxy.europeana.eu/media/92040/URN_RS_NAE_f9e21fcc_e9fc_4c1a_845a11b456b6dfdecho/26518d40afb85e2a7013913289ccb5fd?disposition=inline&recordApiUrl=https%3A%2F%2Fapi.europeana.eu%2Frecord
- Shell Global. (χ.χ.). Military Jet Fuel. Ανάκτηση από <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/military-jet-fuel-grades.html>
- Simon Fraser University. (χ.χ.). Brayton Cycle. (M. Brahami, Συντάκτης) Burnaby, CANADA. Ανάκτηση από <https://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20461/Notes/Brayton%20Cycle.pdf>
- William Z. Black, J. G. (2010). *ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ*. (Ι. Σταθαράς, Επιμ., & Ι. Χ. Ιωάννης Σταθαράς, Μεταφρ.) Αθήνα, Περιστέρι: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΙΩΝ.
- YUNUS A. CENGEL, M. A. (2015). *THERMODYNAMICS: AN ENGINEERING APPROACH, EIGHTH EDITION*. 2 Penn Plaza, New York, NY 10121: McGraw-Hill Education.
- Γούλας, Α. Κ. (1986). *Μηχανική Ρευστών*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.
- Γούλιος, Γ. Β. (χ.χ.). *Στροβιλοκινητήρες: Αρχές Λειτουργίας - Σχεδίασεως*, . Αθήνα. *Δεδομένα από αρχεία της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας*. (χ.χ.).
- ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ Α.Ε. (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://www.haicorp.com/el/>.
- Κακάτσιος, Ξ. (2006). *Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης*. ΑΘΗΝΑ: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ.
- Καρέλας Ευάγγελος, Τ. Ι. (2024). ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ Ι. Ανάκτηση από <http://ebooks.edu.gr/ebooks/handle/8547/3715>
- Πολεμική Αεροπορία. (χ.χ.). C-130 Hercules. Ανάκτηση από <https://www.haf.gr/arsenal/c-130h-hercules/>
- ΠΟΛΕΜΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑ. (χ.χ.). ΠΟΛΕΜΙΚΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΑ. Ανάκτηση από <https://www.haf.gr/arsenal/ab-205/>.
- Πολυζάκης, Α. (2012). *Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Παραγωγή Ενέργειας-Πρώθηση Θεωρία*. Πτολεμαίδα: P.H.C. (Power Heat Cool).

